ISSN 2541-8912 (Print) ISSN 2713-2161 (Online)

ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН



GEOSYSTEMS of Transition Zones



Геосистемы переходных зон

Октябрь – Декабрь

Tom 5 № 4 2021

ISSN 2713-2161 (Online)

GEOSYSTEMS OF TRANSITION Z October – December

Institute of Marine Geology and Geophysics

of the Russian Academy of Sciences

Published since January 2017

Vol. 5 No. 4 2021

Научный журнал

Учредитель и издатель: ФГБУН Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Издается с 2017 г. Периодичность издания 4 раза в год

Основная задача журнала – информирование научной общественности, российской и зарубежной, о результатах изучения геосистем переходных зон Земли и связанных с ними проблем геофизики, геологии, геодинамики, сейсмологии, геоэкологии и других наук.

Журнал:

- индексируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);
- регистрируется в системе CrossRef. Научным публикациям присваивается идентификатор – DOI;
- включен в каталог Ulrich's Periodicals Directory;
- включен в международную базу научных журналов открытого доступа Directory of Open Access Journals (DOAJ);
- входит в Перечень ВАК Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:
- 25.00.01. Общая и региональная геология (геолого-минералогические)
- 25.00.03. Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические)
- 25.00.04. Петрология, вулканология (геолого-минералогические)
- 25.00.10. Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых
- (геолого-минералогические; физико-математические)
- 25.00.25. Геоморфология и эволюционная география (географические)
- 25.00.28. Океанология (географические; геолого-минералогические; физико-математические)
- 25.00.35. Геоинформатика (геолого-минералогические; физико-математические)
- 25.00.36. Геоэкопогия (геолого-минералогические; географические)
- 01.02.04. Механика деформируемого твердого тела (физико-математические; технические)

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Адрес учредителя и издателя ИМГиГ ДВО РАН ул. Науки, 1б, Южно-Сахалинск, 693022 Тел./факс: (4242) 791517 E-mail: gtrz-journal@mail.ru Сайт: http://journal.imgg.ru

The Journal mission is informing of international scientific community about results of researches in the geosystems of Earth transition zones and related problems in Geophysics, Geology, Geodynamics, Seismology, Geoecology and other sciences.

The Journal is:

- indexed in Russian Science Citation Index (RISC);
- registered in the CrossRef system. Scientific publications are assigned an individual identifier DOI;

• included in the Ulrich's Periodicals Directory database; • included in the Directory of Open Access Journals (DOAJ);

• included in the VAK List - the List of peer reviewed scientific journals, in which main research publish the scientific results of dissertations for the Candidate of Sciences and Doctor of Sciences degrees should be published. Scientific specialities of dissertations and their respective branches of science are the following:

- 25.00.01. General and regional geology (Geology and Mineralogy)
- 25.00.03. Geotectonics and Geodynamics (Geology and Mineralogy)
- 25.00.04. Petrology and volcanology (Geology and Mineralogy)
- 25.00.10. Geophysics, geophysical methods of exploration activity (Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics)
- 25.00.25. Geomorphology and evolutionary geography (Geography)
- 25.00.28. Oceanology (Geography; Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics)
- 25.00.35. Geoinformatics (Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics)
- 25.00.36. Geoecology (Geology and Mineralogy; Geography)
- 01.02.04. Mechanics of deformable solids (Physics and Mathematics; Engineering)

Content is available under the Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Postal address

IMGG FFB RAS 1B, Nauki Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022 Tel. / Fax: (4242) 791517 E-mail: gtrz-journal@mail.ru Website: http://journal.imgg.ru

ISSN 2541-8912 (Print)

Scientific journal

Founder and Publisher:

of the Far Eastern Branch

Periodicity: Quarterly

Редакционная коллегия

Главный редактор

- Левин Борис Вульфович, член-корреспондент РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва; Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск
- Заместитель главного редактора
- Богомолов Леонид Михайлович, д-р физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, директор, руководитель Центра коллективного пользования
- Адушкин Виталий Васильевич, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, Институт динамики геосфер РАН; Московский физико-технический институт, Москва
- Алексанин Анатолий Иванович, д-р техн. наук, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
- Быков Виктор Геннадьевич, д-р физ.-мат. наук, Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск
- Завьялов Петр Олегович, член-корреспондент РАН, д-р геогр. наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва
- Закупин Александр Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск – зам. елавного редактора
- Ковалев Дмитрий Петрович, д-р физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск
- Кочарян Геворг Грантович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт динамики геосфер РАН, Москва
- Куркин Андрей Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород
- Лабай Вячеслав Степанович, д-р биол. наук, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск
- Левин Владимир Алексеевич, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток; Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- Лучин Владимир Александрович, д-р геогр. наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
- Марапулец Юрий Валентинович, д-р физ.-мат. наук, доцент, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Паратунка
- Обжиров Анатолий Иванович, д-р геол.-минер. наук, профессор, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
- Огородов Станислав Анатольевич, профессор РАН, д-р геогр. наук, чл.-корр. РАЕН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- Плехов Олег Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
- Прытков Александр Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск – ответственный секоетарь
- Разжигаева Надежда Глебовна, д-р геогр. наук, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток
- Ребецкий Юрий Леонидович, д-р физ.-мат. наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва
- Родкин Михаил Владимирович, д-р физ.-мат. наук, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва
- Рыбин Анатолий Кузьмич, д-р физ.-мат. наук, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия
- Сергеева Ирина Вячеславовна, д-р биол. наук, профессор, Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, Саратов
- Такахаши Хироаки, профессор, Институт сейсмологии и вулканологии Университета Хоккайдо, Япония
- Сасорова Елена Васильевна, д-р физ.-мат. наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва
- Троицкая Юлия Игоревна, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород; Нижегородский гос. университет им Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
- Христофорова Надежда Константиновна, д-р биол. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, чл.-корр. РАЕН, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток
- Шакиров Ренат Белалович, д-р геол.-минер. наук, доцент, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
- Шевченко Георгий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск
- Шеменда Александр Ильич, д-р физ.-мат. наук, профессор исключительного класса, Университет Ниццы – София Антиполис, Франция
- Ярмолюк Владимир Викторович, академик РАН, д-р геол.-минер. наук, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

Editor-in-Chief

- Boris W. Levin, Corr. Member of the RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the RAS, Moscow; Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
- Deputy Editor-in-Chief
- Leonid M. Bogomolov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
- Vitaly V. Adushkin, Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Geosphere Dynamics of the RAS; Moscow Institute of Physics and Technology
- Anatoly I. Alexanin, Dr. Sci. (Eng.), The Institute of Automation and Control Processes of the FEB RAS, Vladivostok
- Victor G. Bykov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics of the FEB RAS, Khabarovsk
- Peter O. Zavyalov, Corr. Member of the RAS, Dr. Sci. (Geogr.), P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the RAS, Moscow
- Alexander S. Zakupin, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk – Deputy Editor-in-Chief
- Dmitry P. Kovalev, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk
- Gevorg G. Kocharyan, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Institute of Geosphere Dynamics of the RAS, Moscow
- Andrei A. Kurkin, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod
- Vyacheslav S. Labay, Dr. Sci. (Biology), Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk
- Vladimir A. Levin, Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., The Institute of Automation and Control Processes of the FEB RAS, Vladivostok; Lomonosov Moscow State University, Moscow
- Vladimir A. Luchin, Dr. Sci. (Geogr.), V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- Yuri V. Marapulets, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Assoc. Prof., Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation of the FEB RAS, Kamchatka Region
- Anatoly I. Obzhirov, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Prof., V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- Stanislav A. Ogorodov, Prof. RAS, Dr. Sci. (Geogr.), Corr. Member of the RAES, Lomonosov Moscow State University, Moscow
- Oleg A. Plekhov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the RAS, Perm'
- Alexander S. Prytkov, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk – Assistant Editor
- Nadezhda G. Razjigaeva, Dr. Sci. (Geogr.), Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok
- Yuri L. Rebetskiy, Dr. Sci. (Phys. Math.), Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow
- Mikhail V. Rodkin, Dr. Sci. (Phys. Math.), Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the RAS, Moscow
- Anatoly K. Rybin, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Research Station of Russian Academy of Sciences in Bishkek City, Bishkek, Kyrgyzstan
- Irina V. Sergeeva, Dr. Sci. (Biology), Prof., Saratov State Vavilov Agrarian University, Saratov
- Hiroaki Takahashi, Prof., Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, Japan
- Elena V. Sasorova, Dr. Sci. (Phys. and Math.), P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the RAS, Moscow
- Yuliya I. Troitskaya, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhniy Novgorod; Lobachevsky University, Nizhniy Novgorod
- Nadezhda K. Khristoforova, Dr. Sci. (Biology), Prof., Corr. Member of the RAES, Far Eastern Federal University, Vladivostok
- Renat B. Shakirov, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Assoc. Prof., V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- Georgy V. Shevchenko, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk
- Alexandre I. Chemenda (Shemenda), Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professeur des Universités de Classe Exceptionnelle, Université de Nice-Sophia Antipolis, France
- Vladimir V. Yarmolyuk, Academician of RAS, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the RAS, Moscow

Editorial Board

ГЕОСИСТЕМЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН Том 5 № 4 2021 Октябрь – Декабрь

https://doi.org/10.30730/gtrz-2021-5-4

Содержание

Геофизика. Сейсмология

Океанология

Геоинформатика

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

Вулканология

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

Геоэкология

краткое сообщение

Экология

Механика деформируемого твердого тела

GEOSYSTEMS OF TRANSITION ZONES Vol. 5 No. 4 2021 October - December

https://doi.org/10.30730/gtrz-2021-5-4

Content

Geophysics. Seismology

Oceanology

Geoinformatics

SHORT REPORT

http://journal.imgg.ru

Volcanology

SHORT REPORT

Geoecology

Ecology

Mechanics of deformable solids

УДК 550.34

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.308-319

Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2020 году

© 2021 Д. А. Сафонов^{*1}, Т. А. Фокина²

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия ²Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: d.safonov@imgg.ru

Резюме. В работе представлен обзор сейсмичности за 2020 г. южной части Дальнего Востока России: регионов Приамурье и Приморье, Сахалинского и Курило-Охотского, основанный на предварительных данных каталогов землетрясений Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН). Выполнен анализ сейсмичности регионов за 2020 г. в сравнении с предыдущим десятилетием. Приведена информация о наиболее значительных и достойных отдельного изучения землетрясениях 2020 г., происшедших в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН: землетрясение вблизи Зейской ГЭС; глубокофокусное землетрясение в Татарском проливе; землетрясение на промежуточных глубинах на Южных Курилах; взбросовое землетрясение на изгибе Тихоокеанской литосферной плиты в районе Северных Курил. По формальным показателям сейсмичность регионов в 2020 г. осталась в пределах фоновых значений, но в Курило-Охотском регионе и в мантии под территорией Сахалинского региона приблизилась к верхней границе их диапазона.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмичность, сейсмическая активность, Приамурье, Приморье, Сахалин, Курило-Охотский регион

Seismicity of the South Far East of Russia in 2020

Dmitry A. Safonov^{*1}, Tatyana A. Fokina²

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia ²Sakhalin Branch of the Federal research center "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences", Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

*E-mail: d.safonov@imgg.ru

Abstract. The paper presents an overview of the seismicity of the southern part of the Russian Far East for 2020: the Amur–Primorye region, Sakhalin and Kuril-Okhotsk regions. It is based on the preliminary data from the earthquake catalogs of the Sakhalin Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences" (SB FRC UGS RAS). An analysis of the seismicity of the regions for 2020 in comparison with the previous decade is performed. Information about the earthquakes of 2020, which are the most significant and worthy of separate study, is given. These events occurred in the SB FRC UGS RAS responsibility zone: an earthquake near the Zeyskaya HPP, a deep-focus earthquake in the Tatar Strait, an earthquake at intermediate depths in the Southern Kuril Islands, a reverse fault earthquake on the bend of the Pacific lithospheric plate in the Northern Kuril Islands. According to formal indicators, the seismicity of the regions in 2020 remained within the background values, but it approached the upper limit of their range in the Kuril-Okhotsk region and in the mantle under the territory of the Sakhalin region.

Keywords: earthquakes, seismicity, seismic activity, Amur region, Primorye, Sakhalin, Kuril-Okhotsk region

Для цитирования: Сафонов Д.А., Фокина Т.А. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2020 году. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 4, с. 308–319. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.308-319 *For citation:* Safonov D.A., Fokina T.A. Seismicity of the South Far East of Russia in 2020. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 308–319. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.308-319

308

Введение

Данная статья продолжает начатый в работах [Сафонов и др., 2019а; Сафонов и др., 2020] ежегодный обзор сейсмичности территории юга Дальнего Востока России. Областью исследования являются Курило-Охотский регион (Курильские острова, о. Хоккайдо, прилегающая часть Тихого океана, южная и центральная части акватории Охотского моря, северная часть Японского моря); Сахалинский регион (о. Сахалин и прилегающие акватории Охотского, Японского морей и Татарского пролива); регион Приамурье и Приморье (Приморский и большая часть Хабаровского края, Амурская и Еврейская автономные области, а также приграничные районы Китая и прибрежная часть Японского моря) (рис. 1). Регистрацией сейсмических событий естественного и техногенного характера на территории этих трех регионов занимается Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Южно-Сахалинск.

Поскольку окончательный сбор всей сейсмологической информации, необходимой для составления детальных каталогов землетрясений, требует определенного времени, публикация окончательных каталогов и обзора сейсмичности территории на их основе отстает на 2 года в ежегодниках «Землетрясения России...» (например, сводка землетрясений за 2016 год в [Фокина и др., 2018]) и на 6 лет в журнале «Землетрясения Северной Евразии» (например, о землетрясениях 2013 г. в [Фокина и др., 2019; Коваленко и др., 2019]). Данная работа выполнена на основе оперативного (предварительного) каталога землетрясений за 2020 г., информация в котором пополняется с отставанием в 1–3 дня от даты происходящих землетрясений. Цель работы – предоставить заинтересованным специалистам комплексную оперативную информацию о сейсмичности южной части Дальнего Востока РФ. В статье проводится обзор сейсмичности в 2020 г., обращается внимание на наиболее интересные и заслуживающие изучения сейсмические события. Сравниваются параметры сейсмичности региона в прошедшем году и в предыдущем десятилетии.

Сеть сейсмологических наблюдений СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2020 г. по сравнению с 2019-м практически не претерпела изменений [Сафонов и др., 2020].

В рамках взаимодействия со структурными подразделениями ГУ МЧС России по Сахалинской области летом 2020 г. сотрудниками СФ ФИЦ ЕГС РАН в пос. Южно-Курильск (о. Кунашир) и Китовое (о. Итуруп) установлены пункты наблюдения с комплектом сейсмологического оборудования (широкополосный велосиметр, акселерометр, системы регистрации, сбора и передачи данных). Информация с пунктов наблюдения в режиме реального времени передается в информационно-вычислительный центр СФ ФИЦ ЕГС РАН и аварийноспасательный центр мониторинга и прогноза чрезвычайных ситуаций Главного управления МЧС России по Сахалинской области [Костылев, 2021]. В связи с тем, что новые пункты наблюдения установлены вблизи действующих сейсмических стационаров «Южно-Курильск»

> Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2020 г. 50-*М* – магнитуда; *H* – глубина гипоцентра, км; 1 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН; 2 – границы регионов. Показаны механизмы очагов землетрясе-46-ний в Приамурье и Сахалинском регионе. Номера эпицентров согласно таблице.

> Fig. 1. Earthquake epicenters map in the SB FRC UGS RAS responsi- 42 bility zone in 2020. M – magnitude; H – hypocenter depth, km; 1 – seismic stations; 2 – region borders. Earthquakes focal mechanisms of the Amur and the Sakhalin regions 38 are shown. Epicenters' numbers are in accordance with the table.



и «Курильск», разрешающая способность сети сейсмостанций на Южных Курилах изменилась незначительно, однако существенно возросла надежность регистрации.

Текущая конфигурация сети сейсмических станций (рис. 1, 2), с учетом установленного оборудования и привлечения в оперативном режиме данных станций соседних регионов, позволяет обеспечить на большей части зоны ответственности возможность регистрации как минимум тремя сейсмостанциями (что необходимо для корректного определения эпицентра) землетрясений начиная с представительной магнитуды M_{min} = 3.0. Исключение составляют центральная часть Охотского моря, северная часть Японского моря, район Средних Курильских островов и приграничная часть Приамурья, где представительной можно считать магнитуду событий $M_{min} = 3.5$. Благодаря более плотной сети сейсмостанций, а также доступу к короткопериодным станциям Хоккайдского университета, на части Южных Курил и территории Сахалинского региона порог уверенной регистрации составляет

M_{min} = 2.5 [Костылев, 2021]. При составлении оперативного каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН регистрационные возможности сети в полной мере не используются, его представительная магнитуда выше как минимум на единицу.

В практике обработки записей землетрясений Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН определяется большое количество энергетических характеристик землетрясений (магнитуды, энергетические классы). В данной работе авторы используют для расчетов в качестве основной моментную магнитуду М_w. Магнитудные оценки по этой шкале наиболее устойчивы и согласуются с определениями других сейсмологических агентств. Сахалинский филиал определяет M_W только для наиболее сильных землетрясений при расчете тензора сейсмического момента центроида. В случае ее отсутствия в каталогах для сильных землетрясений ($M \ge 5.0$ для Сахалинского региона и *M* > 5.5 для Курило-Охотского) авторы привлекали данные зарубежных агентств (GCMT, NIED). А для более слабых событий использовали магнитуду по поверхностной волне M_{IH} , магнитуду по объемной волне M_{SH} , энергетический класс С.Л. Соловьева K_C , энергетический класс Т.Г. Раутиан K_p и другие варианты энергетических характеристик, сводимые по соответствующим переходным формулам [Фокина и др., 2019] к M_{1H}, обозначаемой в таком случае М.

Обзор землетрясений Приамурья, Приморья, Курило-Охотского и Сахалинского регионов

Сейсмическая активность региона **При**амурье и **Приморье** обычно невысока. Хотя итоговые каталоги содержат несколько сотен сейсмических событий (существенная часть из которых – промышленные взрывы), по оперативным данным обычно определяются только наиболее сильные землетрясения. Оперативный каталог за 2020 г. содержит 11 землетрясений с эпицентрами на территории Приамурья и Приморья, включая два глубокофокусных, относящихся к продолжению под территорию региона Японской сейсмофокальной зоны (рис. 1).

Наиболее сильное землетрясение, происшедшее в земной коре с эпицентром на территории региона, – событие 28 февраля в 23:09 UTC ($M_W = 4.7, M_{LH} = 4.7, H = 12$ км; № 2 в таблице и на рис. 1, 2). Плейстосейстовая область землетрясения находится вблизи Станового хребта в слабозаселенной части Зейского района Амурской области, в г. Зея оно ощущалось с интенсивностью в 2 балла. Землетрясение произошло в условиях ЮЗ–СВ горизонтального сжатия, механизм очага в классификации по кинематическому типу сейсмодислокации определяется как взбросовый.

Наиболее сильные сотрясения на территории Приамурья и Приморья вызвало землетрясение, происшедшее под Зейским водохранилищем 4 февраля в 03:48 UTC ($K_p = 11.1$, M = 3.9, H = 12 км; № 1 в таблице и на рис. 1, 2). Энергия этого землетрясения невелика, однако эпицентр расположен в довольно населенной части Зейского района. Это объясняет относительно высокую зарегистрированную интенсивность сотрясений – до 4 баллов. В связи с близостью к Зейской ГЭС землетрясение может оказаться интересным для изучения.

8 ноября в 21:53 UTC произошло землетрясение ($K_p = 11.2, M = 4.0, H = 9$ км; № 4 в таблице и на рис. 1) в северной части Хабаровского края. Ощутимых проявлений в населенных пунктах не отмечено.

Наиболее сильное в 2020 г. глубокофокусное землетрясение на территории региона произошло 14 июля в 08:45 UTC ($M_{SH} = 4.8$, H = 565 км, № 3 в таблице и на рис. 1), эпицентр находится в Японском море к югу от г. Владивосток. Ощутимых сотрясений на поверхности столь глубокое и не слишком сильное событие ожидаемо не вызвало.

По *Сахалинскому региону* в оперативном каталоге за 2020 г. содержатся параметры 54 землетрясений, из них 45 относятся к коровым, 9 произошли в мантии на продолжении Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны под территорией региона (рис. 1). 11 землетрясений ощущались жителями Сахалинской области (рис. 2).

Самое сильное землетрясение с гипоцентром в земной коре произошло в Углегорском районе Сахалинской области 13 сентября в 13:42 UTC ($M_{LH} = 5.2, H = 10$ км; № 7 в таблице и на рис. 1, 2, 3). Оно же произвело максимальный макросейсмический эффект в регионе: интенсивность сотрясений в г. Углегорск и других населенных пунктах района достигала 5 баллов. Землетрясение сопровождалось многочисленными афтершоками, сильнейший из которых произошел в 14:09 UTC того же дня ($M_{LH} = 4.7, H = 10$ км; № 8 в таблице и на рис. 1, 2, 3).

Поскольку эпицентр землетрясения находится вблизи активно эксплуатируемого Солнцевского угольного разреза, высказываются предположения о техногенной природе этого землетрясения. Первая детальная информация опубликована в статье [Семенова и др., 2020]. Из этой же статьи следует, что механизм очага землетрясения и его крупнейшего афтершока сдвиговый, очаг сформировался в условиях близгоризонтальных субмеридионального сжатия и субширотного растяжения.

Умеренное землетрясение с эпицентром в Анивском заливе произошло 23 января в 06:22 UTC ($K_c = 10.2, M = 4.5, H = 13$ км; $N \ge 5$ в таблице и на рис. 1, 2, 3). В ближайшем к эпицентру пос. Таранай интенсивность сотрясений оценивается в 4 балла.

Близкое по энергии землетрясение произошло на перешейке Поясок 2 июля в 13:48 UTC ($K_c = 10.3, M = 4.6, H = 3$ км; № 6 в таблице и на рис. 1, 2, 3). Интенсивность сотрясений в пос. Пугачево, Арсентьевка и на ж/д станции Тихая оценивается в 3 балла.

Самое сильное по энергии в 2020 г. землетрясение в Сахалинском регионе произошло 30 ноября в 22:54 UTC ($M_W = 6.3, M_{SH} = 7.0, H = 577$ км; № 9 в таблице и на рис. 1, 2). Эпицентр находится в центральной части Татарского пролива примерно на широте пос. Ильинский. Несмотря на большую глубину гипоцентра, почти предельную для землетрясений Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны, землетрясение ощущалось на поверхности. Макросейсмический эффект зафиксирован во многих населенных пунктах южной части о. Сахалин, включая г. Южно-Сахалинск, он оценивается в 2-3 балла. Механизм очага землетрясения классифицируется как взрез либо пологий сброс с субвертикальной плоскостью широтного и субгоризонтальной плоскостью юго-западного простирания. Землетрясение произошло в условиях сжатия, ось которого ориентирована примерно вдоль направления падения сейсмофокальной зоны.

На территории *Курило-Охотского региона* по данным оперативного каталога определены параметры 1008 землетрясений, включая 64 события, вызвавшие ощутимые колебания в населенных пунктах островов (рис. 2, 3). Распределение землетрясений по сейсмоактивным участкам региона в основном сходно с распределением предыдущих лет (рис. 3): большая часть гипоцентров принадлежит межплитовым событиям зоны контакта Тихоокеанской и Охотской литосферных плит; гипоцентры некоторых событий можно отнести



Рис. 2. Карта эпицентров ощутимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2020 г. по данным оперативного каталога. *М* – магнитуда; *I* – максимальная интенсивность сотрясений, балл; 1 – сейсмические станции СФ ФИЦ ЕГС РАН; 2 – границы регионов. Номера эпицентров согласно таблице.

Fig. 2. Appreciable earthquake epicenters map in the 42°SB FRC UGS RAS responsibility zone by the data of the operative catalog in 2020. *M* – magnitude; *I* – maximum shaking intensity; 1 – seismic stations; 2 – region 38°borders. Epicenters' numbers are in accordance with the table. к внутриплитовым, произошедшим во внешней, относительно глубоководного желоба, зоне изгиба Тихоокеанской плиты либо во внутренней – на промежуточных глубинах под островной дугой; также зарегистрировано несколько землетрясений внутри Охотской плиты северозападнее островов Кунашир, Итуруп и Парамушир. Среди землетрясений региона в 2020 г. особенно выделяются как по энергетическому признаку, так и по ощутимости два сильнейших за последние годы землетрясения. В отличие от обычной картины распределения землетрясений, очаги двух сильнейших событий находятся внутри Тихоокеанской литосферной плиты.

Сильное землетрясение 13 февраля в 10:33 UTC ($M_W = 6.9$, $M_{SH} = 7.8$, H = 150 км; № 10 в таблице и на рис. 1, 2, 3) произошло в районе Южных Курил, эпицентр расположен между островами Итуруп и Уруп. Землетрясение ощущалось во всех населенных пунктах Южно-Курильского и Курильского районов с интенсивностью сотрясений в 5-5-6 баллов. Механизм очага определяется как взрез либо пологий сброс, субвертикальная нодальная плоскость ориентирована вдоль островной дуги, субгоризонтальная падает на юг. При этом ось растяжения близка по направлению к падению сейсмофокальной зоны, т.е. очаг сформировался в условиях геодинамического состояния растяжения вдоль плиты. Судя по положению гипоцентра и механизму очага, землетрясение произошло в нижнем слое двойной сейсмофокальной зоны на интервале промежуточных глубин Курило-Камчатской субдукционной системы. За последние полвека наблюдений это третье по силе землетрясение на промежуточных глубинах в районе Южных Курил.

Сильнейшее за последнее десятилетие землетрясение с эпицентром в Курило-Охот-

ском регионе в пределах зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН произошло 25 марта в 02:49 UTC (M_W = 7.5, M_{LH} = 7.5, H = 72 км; № 11 в таблице и на рис. 1, 2, 3). Гипоцентр расположен под Курильским глубоководным желобом напротив Северных Курил. На территории Сахалинской области это событие ощущалось вдоль всей Курильской островной дуги, сильнее всего – в г. Северо-Курильск с интенсивностью в 5-6 баллов. Механизм очага землетрясения – взбросовый, нодальные плоскости ориентированы вдоль островной дуги. В течение года в очаговой области землетрясения зарегистрировано несколько десятков афтершоков, магнитуда самых сильных не превысила $M_{LH} = 5.5$. Интенсивность макросейсмических проявлений афтершоков г. Северо-Курильск достигала 3-4 баллов. Землетрясение вызвало большой интерес у исследователей. Первые результаты изложены в статьях [Ye et al., 2021; Прытков, Василенко, 2021]. Землетрясение 25 марта стало самым сильным известным внутриплитовым событием, сформировавшимся в условиях субгоризонтального сжатия на внешнем изгибе Тихоокеанской плиты в Курило-Камчатской зоне субдукции.

В 2020 г. в рамках сотрудничества СФ ФИЦ ЕГС РАН с ИМГиГ ДВО РАН продолжалось массовое определение тензора сейсмического момента центроида для землетрясений рассматриваемых регионов. Расчет осуществляется с использованием программного комплекса ISOLA [Sokos, Zahradník, 2013; Сафонов, Коновалов, 2017]. Всего в 2020 г. удалось получить решения тензора сейсмического момента центроида для 45 землетрясений, в частности для 1 события в регионе Приамурье и Приморье, 2 в Сахалинском регионе и 42 в Курило-Охотском регионе.



Fig. 3. The earthquake epicenters of the Kuril-Okhotsk region by the data of the SB FRC UGS RAS operative catalog in 2020. Epicenters' numbers are in accordance with the table.



Ma	Дата/Date	Время/Time	1 NI	λΕ	h, км	М	Интенсивность сотрясений (населенный						
JNG	day.mon.year	h:min:sec	φ 1				пункт, балл / Intensity, points)						
Приамурье и Приморье / Amur-Primorye region													
1	04.02.2020	03:48:41.7	54.14	127.36	12	3.9	Береговой, 4; Золотая Гора, 3; Снежногорский, 3; Зея, 3						
2	28.02.2020	23:09:08.4	55.57	130.27	12	4.7	Зея, 2						
3	14.07.2020	08:45:58.3	42.23	131.40	565	4.8	Не ощущалось						
4	08.11.2020	21:53:23.3	54.03	135.28	9	4.0	Не ощущалось						
Caxaлинский регион / Sakhalin region													
5	23.01.2020	06:22:38.3	46.47	142.44	13	4.5	Таранай, 4; Анива, 3-4; Корсаков, 2; Невельск, 2; Шебунино, 2						
6	02.07.2020	13:48:13.8	48.13	142.47	3	4.6	Тихая, 3; Пугачево, 3; Арсентьевка, 3; Взморье, 2						
7	13.09.2020	13:42:24.3	48.90	142.00	10	5.2	Углегорск, 5; Краснополье, 5; Поречье, 5; Ольховка, 4-5; Шахтерск, 4; Медвежье, 4						
8	13.09.2020	14:09:00.3	48.91	142.15	10	4.7	Углегорск, 4						
9	30.11.2020	22:54:34.7	48.00	141.00	577	6.3	Горнозаводск, 2-3; Троицкое, 2-3; Томари, 2-3; Новотроицкое, 2-3; Синегорск, 2-3; Чехов, 2-3; Южно-Сахалинск, 2-3						
		K	урило-Ох	котский р	егион / К	urile-Okh	otsk region						
10	13.02.2020	10:33:43.5	45.37	149.25	150	6.9	Горячие Ключи, 5-6; Горный, 5-6; Рейдово, 5; Китовый, 5; Курильск, 5; Южно-Курильск, 5; Лагунное, 5; Горячий Пляж, 5; Менделеево, 5; Головнино, 5; Малокурильское, 5; Крабозаводское, 5						
11	25.03.2020	02:49:20.3	48.88	157.80	72	7.5	Северо-Курильск, 5-6; Южно-Курильск, 3; Лагунное, 3; Горячий Пляж, 3						

Таблица. Параметры отдельных землетрясений 2020 г. по оперативным данным *Table.* Parameters of certain earthquakes in 2020 according to the operational data

Энергия землетрясений

В связи с изменением приоритета магнитудных шкал в каталогах (использование в расчетах для сильных землетрясений моментной магнитуды M_W как основной) несколько изменились графики суммарной ежегодной сейсмической энергии ΣE , выделившейся в результате землетрясений в исследуемых регионах (рис. 4).

Энергия отдельного землетрясения, как и в предыдущих статьях [Сафонов и др., 2019а; Сафонов и др., 2020], вычисляется по формуле Гутенберга–Рихтера [Gutenberg, Richter, 1942]:

lg
$$E = 4.8 + 1.5 M$$
 (Дж), (1)

где E – сейсмическая энергия землетрясения, а M – магнитуда M_W либо, в случае ее отсутствия, M_{IH} .

Рассчитывать энергию по магнитуде M_w , являющейся производной величиной от скалярного сейсмического момента, в свою очередь отражающего параметры очага землетрясения и не зависящего от динамики развития разрыва, не вполне корректно. Однако, в связи с большим разбросом магнитудных оце-

нок для умеренных и сильных землетрясений в оперативных каталогах СФ ФИЦ ЕГС РАН и отличием этих оценок от данных других агентств, использование M_w все же дает более справедливую и устойчивую оценку изменения суммарной сейсмической энергии. В работе [Гусев и др., 1990] показано, что магнитуда по поверхностной волне M_s (она же M_{LH}) на интервале магнитуд 6.0–8.0 практически совпадает с M_w . Подтверждением этого можно считать то, что пересчитанные нами графики суммарной сейсмической энергии (рис. 4) за 2010–2018 гг. слабо изменились по сравнению с показанными в предыдущих обзорах [Сафонов и др., 2019а; Сафонов и др., 2020].

По графику (рис. 4) можно отметить, что для глубоких землетрясений Сахалинского региона 2020 год выделяется резким максимумом суммарной сейсмической энергии, уступающим, однако, абсолютному максимуму 2012 г. (глубокофокусное землетрясение 14 августа 2012 г. с $M_W = 7.7$). Для Курило-Охотского региона 2020 год стал рекордным по сейсмической энергии за десятилетие. Сравнение уровня энергии землетрясений регионов на временной



Рис. 4. Суммарная сейсмическая энергия землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2010–2020 гг. Fig. 4. Total seismic energy of the earthquakes in the SB FRC UGS RAS responsibility zone in 2010–2020.

шкале хоть и является наглядным, лишено формальных критериев качественной оценки.

В 2020 г. для более формализованного количественного сравнения сейсмичности регионов по отношению к предыдущим годам были построены функции распределения годовой сейсмической энергии отдельно для глубоких и коровых землетрясений Приамурья и Приморья, Сахалина и совокупной – для Курило-Охотского региона. Применялась хорошо зарекомендовавшая себя методика статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 В.А. Салтыкова [Салтыков, 2011]. Использование суммарной энергии ΣЕ для характеристики сейсмичности связано с ее большей устойчивостью при работе с каталогами разного качества, поскольку большей частью она зависит от наиболее сильных землетрясений. Даже если уровень надежной регистрации землетрясений низок (как в случае оперативного каталога), сильнейшие из произошедших событий регистрируются без пропусков. Однако проблема каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН – в низкой надежности магнитудных оценок даже сильных землетрясений. С переходом к M_w как к основной энергетической характеристике наиболее сильных землетрясений решено включить СОУС'09 в обзор региональной сейсмичности.

Методика предполагает построение на основе имеющихся длительных каталогов землетрясений региона эмпирической функции распределения суммарной за год сейсмической энергии ΣE :

$$F(K) = P(\lg \Sigma E \le K), \tag{2}$$

где *К* – квантиль распределения, Р – вероятность непревышения указанного значения.

Далее для любого года в границах того же региона можно определить, к какому кванти-

лю принадлежит логарифм суммарной сейсмической энергии.

Автором методики [Салтыков, 2011] предлагается следующая шкала уровней сейсмичности:

экстремально высокий – $K(0.995) < \lg \Sigma E$, высокий – $K(0.975) < \lg \Sigma E < K(0.995)$, фоновый пониженный – $K(0.025) < \lg \Sigma E < K(0.15)$,

фоновый средний – $K(0.15) < \lg \Sigma E < K(0.85)$, фоновый повышенный – $K(0.85) < \lg \Sigma E < K(0.975)$,

низкий – $K(0.005) < \lg \Sigma E < K(0.025)$,

экстремально низкий – $\lg \Sigma E < K(0.005)$.

Согласно такой градации, в 95 % случаев сейсмичность региона находится на фоновом уровне, внутри которого есть еще три позиции.

Функция распределения для коровых и глубокофокусных землетрясений Приамурья и Приморья построена на основе каталога землетрясений [Сафонов и др., 2019b], дополненного данными каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН, в интервале времени 1975-2020 гг., данные за более ранний период не использовались по причине возможных пропусков сильных землетрясений. Для Сахалинского региона использовался каталог [Поплавская (ред.), 2006], дополненный материалами СФ ФИЦ ЕГС РАН, в интервале времени 1962-2020. Для Курило-Охотского региона использовался каталог [Ким, Андреева, 2009], дополненный данными филиала, на временном интервале 1920–2020. Содержание всех каталогов приведено к современным границам соответствующих регионов (рис. 1).

Как видно из рис. 5 а, сейсмичность Приамурья и Приморья в 2020 г., как и в предыдущие 5 лет, не выходит из интервала фоновой, хотя коровая сейсмичность держится вблизи центральных квантилей распределения K(0.39), а уровень глубокофокусной сейсмичности оценивается как фоновый пониженный K(0.088).

В Сахалинском регионе (рис. 5 b) уровень энергии коровой сейсмичности в 2020 г. также держится вблизи центральных квантилей распределения K(0.56), а мантийная сейсмичность, благодаря редкому сильному глубокофокусному землетрясению, оказалась в области фоновых повышенных значений почти у ее верхней границы K(0.962).

Сейсмичность Курило-Охотского региона (рис. 6), несмотря на сильнейшее за последнее десятилетие землетрясение, осталась в пределах фонового среднего уровня K(0.81),



Рис. 5. Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии для коровых (черный цвет линии) и мантийных (серый цвет) землетрясений региона Приамурье и Приморье (а) и Сахалинского региона (b). Отмечены точки, соответствующие каждому году периода 2016–2020.

Figure 5. Empirical distribution function of the annual seismic energy for crustal (black line) and mantle (gray line) earthquakes in the Amur-Primorye region (a) and in the Sakhalin region (b). The points corresponding to each year of 2016–2020 period are marked.



Рис. 6. Эмпирическая функция распределения годовой сейсмической энергии землетрясений Курило-Охотского региона. Отмечены точки, соответствующие каждому году периода 2011–2020.

Figure 6. Empirical distribution function of the annual seismic energy of earthquakes in the Kuril-Okhotsk region. The points corresponding to each year of 2016–2020 period are marked.

хотя 2020 г. и стал самым высокосейсмичным за последние 10 лет, превзойдя показатель 2013 г. (без учета землетрясения 24.05.2013, $M_w = 8.3$ [Чебров и др., 2013], см. ниже). Все годы последнего десятилетия сейсмичность остается на фоновом уровне, однако чаще попадает в нижние квантили, самая слабая сейсмичность была в 2017 г. – почти на нижней границе фонового пониженного уровня.

Сейсмическая активность и график Беньофа

По-прежнему удобным способом проследить динамику сейсмичности на временной шкале является график накопления условной деформации по Беньофу [Benioff, 1951]. Использование условной деформации $\Sigma E^{1/2}$ позволяет уменьшить влияние пиковых значений сейсмической энергии наиболее сильных землетрясений, а наклон графика дает представление о повышении или понижении уровня фоновой сейсмичности.

В связи с пересмотром магнитуд наиболее сильных землетрясений (вместо M_{LH} базовой расчетной магнитудой считается M_w в график Беньофа за десятилетний период внесены некоторые изменения по сравнению с опубликованным в [Сафонов и др., 2020]. Прибавилось землетря
сений магнитудой $M_W \ge 6.7$, которые отмечают заметные ступеньки на графике (рис. 7 а). Сильнейшее землетрясение десятилетия в Курило-Охотском регионе с $M_{w} = 8.3$, произошедшее 24 мая 2013 г. на глубине свыше 600 км [Чебров и др., 2013], удалено с графика Беньофа. Формально расположение его эпицентра у побережья Камчатки выходит за границы зоны ответственности Сахалинского филиала (по оперативным данным). При этом очаг землетрясения, а также некоторые сильные афтершоки, например магнитудой $M_{w} = 6.7$ в тот же день 24 мая 2013 г., находятся в пределах изучаемой территории. Этот афтершок, вместе с другими сильными землетрясениями, которых в 2013 г. было много и в других районах Курило-Охотского региона, отмечают самую значительную ступень на графике Беньофа с 2010 по 2020 г. Вторая по величине ступень на графике (рис. 7 а) относится к 2020 г. Как очевидно из графика Беньофа за 2020 г. (рис. 7 b), эта ступень накопления условной деформации в большей степени обусловлена двумя описанными выше сильными событиями – 13 февраля $M_w = 6.9$, и 25 марта $M_w = 7.5$. Вне периода



Рис. 7. График Беньофа для Курило-Охотского региона по данным каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН за 2010–2020 гг. (а) и оперативного каталога за 2020 г. (b).

Figure 7. Benioff diagrams for the Kuril-Okhotsk region by the data of the SB FRC UGS RAS catalogs for 2010–2020 (a) and the operative catalog for 2020 (b).

сейсмической активизации, связанной с этими событиями (особенно со вторым, сопровождавшимся большим количеством афтершоков), скорость накопления условной деформации остается стабильной, наклон графика сопоставим со спокойными периодами предыдущих лет. Кратковременная локальная активизация сейсмичности в некоторых районах не привела к активизации всего региона.

Помимо карт эпицентров (рис. 1, 3) пространственное распределение сейсмичности территории Курило-Охотского региона в 2020 г. и для десятилетнего интервала 2010–2019 гг. отражено на картах сейсмической активности для энергетического уровня A_{10} , построенных методом суммирования с постоянной детальностью [Ризниченко, 1964] (рис. 8). Методические аспекты построения описаны в [Сафонов и др., 2019а]. В 2020 г. области построения карт были несколько расширены за счет территории Сахалинского региона и района о. Хоккайдо. Строить подобную карту для региона Приамурье и Приморье неэффективно ввиду малого количества землетрясений в оперативном каталоге. За длительный период подобная карта приведена в [Сафонов и др., 2019b].

Наиболее сейсмически активным в 2020 г. продолжает оставаться район северных Курильских островов. Здесь выделяется две области пиковой сейсмической активности – вблизи очага землетрясения 25.03.2020 ($A_{10} = 6.1$) и северо-восточнее, где происходят межплитовые землетрясения ($A_{10} = 4.1$). Уровень сейсмической активности в 2020 г. здесь превышает максимальный показатель, усредненный за десятилетний период ($A_{10} = 2.9$). Еще один максимум сейсмической активности находится в районе Южных Курил между желобом и о. Итуруп. Уровень сейсмической активности в 2020 г. ($A_{10} = 2.0$) здесь ниже максимальных десятилетних значений ($A_{10} = 2.8$).

В районе Средних Курил уровень сейсмической активности в 2020 г. ($A_{10} = 0.5$) существенно ниже максимальных десятилетних оценок для этой территории ($A_{10} = 1.3$).

Южный фланг Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны проходит под о. Хоккайдо. Здесь максимальная сейсмическая активность (рис. 8 b) наблюдается к юго-востоку от острова, в районе контакта литосферных плит, однако сильные землетрясения могут происходить и глубже, до глубин в 200–250 км под северо-западной частью острова, регулярно происходят и активизации коровой сейсмичности. Так, на рис. 8 b пиковые значения ($A_{10} = 1.0$) большей частью являются следствием афтершокового процесса корового землетрясения 05.09.2018 ($M_w = 6.7$). В 2020 г. максимальные значения сейсмической активности ($A_{10} = 0.6$) относятся к северо-восточной части района (рис. 8 а).

Оценить уровень сейсмической активности Сахалинского региона за один год достаточно сложно из-за малого количества данных, в основном максимумы активности совпадают с эпицентрами сильных землетрясений, имевших афтершоки. Пиковые значения ($A_{10} = 0.3$) находятся примерно на одном уровне с максимальными значениями сейсмической активности за десятилетний период ($A_{10} = 0.4$).

Таким образом, по критерию сейсмической активности *A*₁₀ сейсмичность в районе северных и южных Курильских островов продолжа-



Рис. 8. Сейсмическая активность Сахалинского и Курило-Охотского регионов по данным оперативного каталога землетрясений СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2010–2019 гг. (а) и каталога землетрясений СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2010–2019 гг. (b). Изолинии оконтуривают области, где ежегодное количество землетрясений энергетического класса $K_c = 10$ из расчета на 1000 км² равно либо превышает указанное значение. Пунктиром показан глубоководный желоб и контур Курильской котловины.

Fig. 8. Seismic activity of the Sakhalin and Kuril-Okhotsk regions by the data of the earthquake operative catalog of the SB FRC UGS RAS in 2020 (a) and the earthquake catalog of the SB FRC UGS RAS in 2010–2019 (b). Isolines delineate the areas, where the annual number of earthquakes of the energy class $K_c = 10$ per 1000 km² is equal to or exceeds the specified value. The deep-sea trench and the Kuril basin contour are shown with a dotted line.

ет оставаться высокой ($A_{10} > 1$), на Средних Курилах – умеренной ($A_{10} > 0.1$), в Сахалинском регионе и в районе о. Хоккайдо – низкой, местами умеренной.

Можно отметить, что сильное землетрясение 13.02.2020 с $M_W = 6.9$ почти не нашло отражения на карте сейсмической активности рис. 8 а, что связано с отсутствием зарегистрированных афтершоков. Малое количество или полное отсутствие зарегистрированных афтершоков – характерное явление для землетрясений промежуточной и большой глубины. Это может стать причиной недооценки сейсмической активности на больших глубинах изучаемых регионов.

Заключение

В 2020 г. в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН наблюдалась некоторая сейсмическая активизация, проявившаяся в ряде сильных, но не причинивших ущерба землетрясений, изучение которых может оказаться полезным для понимания тектоники юга Дальнего Востока России.

Сейсмичность региона Приамурье и Приморье в 2020 г. оказалась низкой, на фоновом среднем уровне по оценке СОУС'09, а по глубокофокусным землетрясениям – на фоновом пониженном. Наиболее заслуживающим внимания можно считать относительно небольшое событие 04.02.2020 с гипоцентром под Зейским водохранилищем, поскольку оно произошло вблизи Зейской ГЭС. Его изучение важно в связи с проблемой сейсмической опасности для подобных объектов и влияния водохранилищ на региональную сейсмичность.

В Сахалинском регионе коровая сейсмичность в 2020 г. находилась на среднем уров-Привлекает внимание землетрясение не. 13.09.2020, значимое для научных изысканий о влиянии разработки угольных месторождений на региональную сейсмичность. Событие также подчеркивает важность сейсмического мониторинга подобных объектов. Сильное глубокофокусное землетрясение 30.11.2020 $(M_w = 6.3)$, произошедшее под территорией региона, хотя и не является уникальным событием (более сильные землетрясения на больших глубинах зарегистрированы в регионе, например, 14.08.2012, M_{W} = 7.7, и 12.05.1990, M_{W} = 7.2), однако таких событий изучено недостаточно для научных обобщений о нижних сейсмогенерирующих участках Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны. Потому исследование каждого нового представляет особую научную ценность.

Уровень сейсмичности Курило-Охотского региона в 2020 г. оказался самым высоким за прошлое десятилетие, но в границах средних фоновых значений за столетний период. Особенно нужно отметить северную часть гряды, где помимо большого числа межплитовых землетрясений умеренной магнитуды произошло редкое сильное событие 25.03.2020 ($M_w = 7.5$) на изгибе Тихоокеанской плиты, уже привлекшее внимание специалистов. Сейсмичность Южных Курил и о. Хоккайдо по критерию A_{10}

в 2020 г. оказалась немного ниже среднего десятилетнего уровня, однако здесь на промежуточных глубинах произошло интересное для изучения землетрясение 23.02.2020 ($M_w = 6.9$).

В районе Средних Курил сейсмичность остается довольно низкой. Сильных глубокофокусных землетрясений в 2020 г. в Курило-Охотском регионе не отмечено.

Список литературы

1. Гусев А.А., Мельникова В.Н. **1990.** Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки. *Вулканология и сейсмология*, 6: 55–63.

2. Ким Ч.У., Андреева М.Ю. **2009.** Каталог землетрясений Курило-Камчатского региона (1737–2005 гг.). Препринт. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 126 с.

3. Коваленко Н.С., Фокина Т.А., Сафонов Д.А. **2019.** Приамурье и Приморье. Землетрясения Северной Евразии, 22(2013): 161–172. doi:10.35540/1818-6254.2019.22.14

4. Костылев Д.В. **2001.** Формирование единой системы сбора сейсмологической информации в Сахалинском филиале ФИЦ ЕГС РАН. *Российский сейсмологический журнал*, 3(1): 41–53. https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.03

5. Поплавская Л.Н. (ред.). **2006.** *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005.* Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с.

6. Прытков А.С., Василенко Н.Ф. **2021.** Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г. М_w = 7.5. *Геосистемы переходных зон*, 5(2): 113–127. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.113-120.121-127

7. Ризниченко Ю.В. **1964.** Метод суммирования землетрясений для изучения сейсмической активности. *Изв. АН СССР. Сер. Геофизическая*, 7: 969–977.

8. Салтыков В.А. **2011.** Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки. *Вулканология и сейсмология*, 2: 53–59. https://doi.org/10.1134/S0742046311020060

0 Categor II A Veyengen A P 2017 Hereit and

9. Сафонов Д.А., Коновалов А.В. **2017.** Использование программы ISOLA для определения тензора сейсмического момента землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов. *Тихоокеанская геология*, 36(3): 102–112.

10. Сафонов Д.А., Фокина Т.А., Коваленко Н.С. **2019а.** Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2018 году. *Геосистемы переходных зон*, 3(4): 364–376. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.364-376

11. Сафонов Д.А., Нагорных Т.В., Коваленко Н.С. **2019b.** *Сейсмичность региона Приамурье и Приморье*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. 104 с.

12. Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Фокина Т.А., Коваленко Н.С. **2020.** Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2019 году. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 146–159. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.146-159

13. Семенова Е.П., Богинская Н.В., Костылев Д.В. **2020.** Углегорское землетрясение 13 сентября 2020 года (о. Сахалин): предпосылки возникновения и результаты наблюдений в эпицентральной зоне. *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 474–485. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.474-485

14. Фокина Т.А., Коваленко Н.С., Костылев Д.В., Левин Ю.Н., Лихачева О.Н., Михайлов В.И. **2018.** Приамурье и Приморье, Сахалин и Курило-Охотский регион. В ежегоднике: Землетрясения России в 2016 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 45–53.

15. Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Михайлов В.И. **2019.** Сахалин. Землетрясения Северной Евразии, 22(2013): 173–183. doi:10.35540/1818-6254.2019.22.15

16. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А., Кравченко Н.М., Матвеенко Е.А., Митюшкина С.В., Раевская А.А., Салтыков В.А., Чебров Д.В., Ландер А.В. **2013.** Глубокое Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. с магнитудой Мw = 8.3 – сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(21): 17–24.

17. Benioff H. **1951.** Earthquakes and rock creep. *Bull. of the Seismological Society of America*, 41(1): 31–62. https://doi.org/10.1785/bssa0410010031

18. Gutenberg B., Richter C.F. **1942.** Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. *Bull. of the Seismological Society of America*, 32(3): 163–191. https://doi.org/10.1785/BSSA0320030163

19. Sokos E., Zahradník J. **2013.** Evaluating centroid moment tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters*, 84: 656–665. https://doi.org/10.1785/0220130002

20. Ye L., Lay T., Kanamori H. **2021.** The 25 March 2020 M_w 7.5 Paramushir, northern Kuril Islands earthquake and major ($M_w \ge 7.0$) near-trench intraplate compressional faulting. *Earth and Planetary Science Letters*, 556: 116728. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116728

References

1. Gusev A.A., Mel'nikova V.N. **1990.** [Relations between magnitudes: global and Kamchatka data]. *Vulkanologiya i seysmologiya = Volcanology and Seismology*, 6: 55–63. (In Russ., abstr. in Engl.).

2. Kim Ch.U., Andreeva M.Yu. **2009.** [*Earthquake catalog of the Kuril-Kamchatka region (1737–2005)*]. Preprint. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN, 126 p.

3. Kovalenko N.S., Fokina T.A., Safonov D.A. **2019.** Priamurye and Primorye. *Earthquakes in Northern Eurasia*. 22(2013): 161–172. (In Russ., abstr. in Engl.). doi:10.35540/1818-6254.2019.22.14

4. Kostylev D.V. **2021.** [Formation of a unified system for collecting seismological information in the Sakhalin Branch of GS RAS]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* = *Russian J. of Seismology*, 3(2): 41–53. (In Russ.). https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.03

5. Poplavskaya L.N. (ed.) **2006.** [*Regional earthquake catalog of Sakhalin Island, 1905–2005*]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN, 103 p. (In Russ.).

6. Prytkov A.S., Vasilenko N.F. **2021.** The March 25, 2020 M_w 7.5 Paramushir earthquake. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 5(2):113–127. (In Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.113-120.121-127

7 Biznichenko VI V **1964** Metod summirovanija zemletriasenij dli

7. Riznichenko Yu.V. **1964.** Metod summirovaniia zemletriasenii dlia izucheniia seismicheskoi aktivnosti [Studying the seismic activity by the method of earthquakes summation]. *Izv. AN SSSR. Ser. geofizicheskaia*, 7: 969–977. (In Russ.).

8. Saltykov V.A. **2011.** A statistical estimate of seismicity level: The method and results of application to Kamchatka. *J. of Volcanology and Seismology*, 5: 123–128. https://doi.org/10.1134/S0742046311020060

9. Safonov D.A., Konovalov A.V. **2017.** Moment tensor inversion in the Kuril-Okhotsk and Sakhalin regions using ISOLA software. *Tikhookeanskaya geologiya*, 36(3): 102–112. (In Russ.).

10. Safonov D.A., Fokina T.A., Kovalenko N.S. **2019a.** Seismicity of the South Far East of Russia in 2018. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(4): 364–376. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.364-376

11. Safonov D.A., Nagornyh T.V., Kovalenko N.S. **2019b.** *Seismicity of the Amur and Primorye regions*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 104 p. (In Russ., abstr. in Engl.).

12. Safonov D.A., Kostylev D.V., Fokina T.A., Kovalenko N.S. **2020.** Seismicity of the South Far East of Russia in 2019. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(2): 146–159. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.146-159

13. Semenova E.P., Boginskaya N.V., Kostylev D.V. **2020.** Uglegorsk earthquake on September 13, 2020 (Sakhalin Island): preconditions for the occurrence and the results of observations in the epicentral zone. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 474–485. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.474-485

14. Fokina T.A., Kovalenko N.S., Kostylev D.V., Levin Yu.N., Likhacheva O.N., Mikhailov V.I. **2018.** Priamurye and Primorye, Sakhalin and Kuril-Okhotsk region. In: *Zemletryaseniya Rossii v 2016 gody [Earthquakes in Russia, 2016]*. Obninsk: FRC UGS RAS, 45–53. (In Russ.)

15. Fokina T.A., Safonov D.A., Kostylev D.V., Mikhaylov V.I. **2019.** Sakhalin. *Earthquakes in Northern Eurasia*, 22(2013): 173–183. (In Russ., abstr. in Engl.). doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.15

16. Chebrov V.N., Kugaenko Yu.A., Vikulina S.A., Kravchenko N.M., Matveenko E.A., Mitiushkina S.V., Raevskaya A.A., Saltykov V.A., Chebrov D.V., Lander A.V. **2013.** [Deep earthquake in the Sea of Okhotsk 24.05.2013 with a magnitude Mw = 8.3 – the strongest seismic event near Kamchatka coastline for the period of detailed seismological observations]. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(21): 17–24. (In Russ.).

17. Benioff H. **1951**. Earthquakes and rock creep. *Bull. of the Seismological Society of America*, 41(1): 31–62. https://doi.org/10.1785/bssa0410010031

18. Gutenberg B., Richter C.F. **1942**. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. *Bull. of the Seismological Society of America*, 32(3): 163–191. https://doi.org/10.1785/BSSA0320030163

19. Sokos E., Zahradník J. 2013. Evaluating centroid moment tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters*, 84: 656–665. https://doi.org/10.1785/0220130002

20. Ye L., Lay T., Kanamori H. **2021.** The 25 March 2020 M_w 7.5 Paramushir, northern Kuril Islands earthquake and major ($M_w \ge 7.0$) near-trench intraplate compressional faulting. *Earth and Planetary Science Letters*, 556: 116728. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116728

Сведения об авторах

САФОНОВ Дмитрий Александрович (https://orcid. org/0000-0002-2201-2016), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, d.safonov@imgg.ru

ФОКИНА Татьяна Александровна, начальник отдела сводной обработки сейсмологических данных, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, fokina@seismo.sakhalin.ru

About the Authors

SAFONOV Dmitry A. (https://orcid.org/0000-0002-2201-2016), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, d.safonov@imgg.ru

FOKINA Tatyana A., Head at the Department of summary processing of seismological data, Sakhalin Branch of the United Geophysical Survey of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, fokina@seismo.sakhalin.ru Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 550.834(265.53)

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.320-327

Палеоврезы и газовые зоны плиоцен-четвертичных отложений на площадке инженерно-геологических изысканий на шельфе острова Сахалин

© 2021 В. К. Лексин

ООО «PH-CaxaлинНИПИморнефть», Южно-Сахалинск, Россия E-mail: lex-vasya@mail.ru

Резюме. Перед постановкой буровой платформы и возведением инженерных сооружений в акваториях проводятся инженерно-геофизические исследования с целью выявления и картирования геологических опасностей, в том числе аномальных газовых зон, из которых при прохождении буровой колонны в верхней части геологического разреза возможен непроизвольный выброс углеводородов. В работе представлены результаты экспедиционных исследований, выполненных на площадке инженерно-геологических изысканий с использованием непрерывного сейсмоакустического профилирования. Площадка расположена в Охотском море на северо-восточном шельфе о. Сахалин и примыкает к Ногликскому району Сахалинской области. По данным непрерывного сейсмоакустических комплекса, которые отличаются друг от друга по характеру волновой картины. Обнаружены газовые зоны и палеоврезы в придонной части разреза. Выявленные геологические опасности вынесены на карту и должны быть учтены при дальнейшем бурении скважин и строительстве инженерных сооружений.

Ключевые слова: временной разрез, геологические опасности, газовые зоны, непрерывное сейсмоакустическое профилирование, палеоврез

Paleo-incisions and gas zones of Pliocene-Quaternary sediments at the site of engineering and geological surveys on the shelf of Sakhalin Island

Vasiliy K. Leksin

RN-SakhalinNIPImorneft Limited Liability Company, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia E-mail: lex-vasya@mail.ru

Abstract. The engineering and geophysical studies are carried out before installation of a drilling platform and construction of engineering structures in the water areas in order to identify and map geological hazards, including the anomalous gas zones, from which involuntary release of hydrocarbons is possible, when the drill string passes through in the upper part of the geological section. The paper presents the results of expeditionary studies carried out at the site of engineering and geological surveys using continuous seismoacoustic profiling. The site is in the Sea of Okhotsk at the northeastern shelf of Sakhalin Island and adjoins Nogliksky district of the Sakhalin Region. Two seismoacoustic complexes were identified according to the data of continuous seismoacoustic profiling in the section of the study area, which differ from each other in the nature of the wave pattern. Gas zones and paleo-incisions were found in the bottom part of the section. The identified geological hazards are mapped and must be taken into account during further drilling of wells and construction of engineering structures.

Keywords: time section, geological hazards, gas zones, continuous seismoacoustic profiling, paleo-incision

Для цитирования: Лексин В.К. Палеоврезы и газовые зоны плиоцен-четвертичных отложений на площадке инженерно-геологических изысканий на шельфе острова Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 4, с. 320–327.

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.320-327

For citation: Leksin V.K. Paleo-incisions and gas zones of Pliocene-Quaternary sediments at the site of engineering and geological surveys on the shelf of Sakhalin Island. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 320–327. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.320-327

Введение

Перед проведением глубоководного бурения для обеспечения его безопасности необходимо исследовать инженерно-геологические условия территории для выявления таких компонентов геологической среды, которые могут неблагоприятно воздействовать на экосистемы и инженерные сооружения или вызвать их разрушение [Миронюк и др., 2013].

Основываясь на многих публикациях [Веселов и др., 2006; Гаврилов, 2009; Акуличев и др., 2014; Керимов и др., 2015; Богоявленский и др., 2016; Петренко и др., 2017; Рыбальченко и др., 2017; Лексин и др., 2018; Новиков, 2018; Голубин и др., 2019; Дзюбло и др., 2019], можно отметить, что на шельфе о. Сахалин возможны такие типы геологических опасностей, как разрывные нарушения, палеоврезы, турбидитовый поток, зоны распространения газовых карманов, газогидраты, покмарки, оползневые отложения.

При проходке буровой колонны наиболее опасной с точки зрения выброса газа является верхняя часть разреза. Для поиска геологических опасностей в верхней части разреза применяются сейсмоакустические исследования методом отраженных волн (МОВ), которые могут проводиться в одноканальном и многоканальном вариантах. Большой вклад в развитие сейсмоакустических исследований в акваториях

Пильтун О-В Сахалин Погиби Дати Дати Дати Дач Км



Fig. 1. Overview sketch map of the area of engineering and geological surveys. Network of SBP profiles at the survey site 100×200 m. (red frame).

внесли российские ученые, например [Калинин, 1965; Калинин и др., 1983; Пивоваров, 1970].

При проведении морских инженерных изысканий для изучения придонных отложений одноканальные исследования освещают геологический разрез от первых до нескольких десятков метров в зависимости от района проведения работ. Многоканальные исследования позволяют изучить геологический разрез на глубину до нескольких сотен метров [Иванов и др., 2016; Казанин и др., 2016; Миронюк и др., 2017; Лексин, 2020].

В оценке степени опасностей, связанных с проявлениями газа в изучаемой части разреза, принято исходить из следующих положений: газ проникает в вышележащие породы по нарушениям или ослабленным зонам, и на сейсмических разрезах эти участки проявляются либо аномалиями высоких амплитуд, либо резким ослаблением сигнала. Резкое затухание сейсмической записи чаще всего происходит при заполнении газом значительной по мощности части разреза. В этом случае на сейсмических разрезах наблюдается понижение скоростей продольных волн (прогибание отражающих границ под такой зоной).

Выявленные геологические опасности обычно выносятся на карту и учитываются при дальнейшем бурении скважин и строительстве инженерных сооружений для исключения все-

возможных аварий и экологических катастроф.

В нашей работе основой для выявления и оценки геологических опасностей в четвертичных и нижнеплиоценовых отложениях послужили данные непрерывного сейсмоакустического профилирования на площадке инженерно-геологических изысканий. Задачей работы является представление результатов интерпретации сейсмоакустических данных на карте геологических опасностей. Район работ расположен в Охотском море на северо-восточном шельфе о. Сахалин и примыкает к Ногликскому району Сахалинской области (рис. 1).

Геологическое строение района работ

Согласно региональной стратиграфической схеме, в пределах площадки инженерно-геологических изысканий выделены следующие стратиграфические подразделения: мачигарская свита (поздний эоцен), даехуриинская (олигоцен), уйнинская (ранний миоцен), дагинская (ранний-средний миоцен), окобыкайская (средний миоцен), нутовская (поздний миоцен – ранний плиоцен) и помырский горизонт (поздний плиоцен – плейстоцен). Из указанных свит дагинская подразделяется на 3 подсвиты, а нутовская на нижнюю и верхнюю. Опорные разрезы свит изучены в основном по результатам геологического картирования и глубокого поискового бурения на сухопутной части о. Сахалин.

Современные отложения площадки инженерно-геологических изысканий представлены песками, глинами, супесями, торфами с мощностью в несколько десятков метров и распространены повсеместно, слагая морское дно, пляжи, береговые террасы, речные долины.

Площадка изысканий расположена в пределах восточной части Северо-Сахалинского кайнозойского прогиба, образовавшегося в раннем олигоцене (мачигарская свита). В позднем олигоцене, а также в начале и середине миоцена (уйнинско-дагинско-раннеокобыкайский комплекс) на фоне повышения уровня моря интенсивно формировался конседиментационный грабен. Последующее поднятие территории обусловило появление складчатых деформаций, которые наибольшей интенсивности достигли в период от позднего миоцена до позднего плиоцена (нутовская, помырская и дерюгинская свиты). Некоторые следы конседиментационных деформаций обнаруживаются в зонах разломов в конце олигоцена и в среднем миоцене.

Методика исследований

На площадке инженерно-геологических изысканий для детального изучения строения придонных отложений использовали высокочастотное непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП) с электродинамическим источником «Воотег» возбуждения упругих волн с частотой излучения 300 Гц и выходной мощностью источника 200 Дж/выстрел и одноканальной сейсмической косой, состоящей из 8 гидрофонов. «Воотег», закрепленный на катамаране, буксировали на расстоянии 25–30 м от кормы борта судна и на глубине (ниже уровня моря) около 20–30 см. Сейсмическую косу буксировали на глубине 10–20 см. Расстояние между основными профилями на площадке инженерно-геологических изысканий составляло 100 м, между секущими (перпендикулярны береговой линии) – 200 м.

В сущности, метод НСП – модификация сейсмических наблюдений МОВ, называемая методом вертикального времени, методом t_0 или методом центрального луча. Возбуждение и регистрация упругих колебаний производятся через такие интервалы времени, чтобы получать практически непрерывную запись.

Навигационно-геодезическая поддержка НСП обеспечивалась с использованием системы позиционирования, сбора и распределения данных, построенной на базе спутникового навигационного комплекса. Для передачи координат и оперативных отметок на геофизическое оборудование, приема данных эхолота и подачи запускающего импульса на контроллер сейсмоисточника применяли компьютер распределения данных, объединенный в локальную сеть с навигационным компьютером.

Обработку данных НСП выполняли в программном пакете Landmark ProMAX, интерпретацию временных сейсмоакустических разрезов – LMKR GeoGraphix. Автор принимал участие в обработке и интерпретации сейсмических данных.

Результаты и обсуждение

По данным непрерывного сейсмоакустического профилирования в разрезе изучаемой площадки выделено два сейсмоакустических комплекса, которые отличаются друг от друга по характеру волновой картины. Первый сейсмоакустический комплекс (САК 1) залегает в верхней части разреза и своей верхней границей совпадает с дном моря (рис. 2). Ниже по разрезу, с угловым несогласием по отношению к вышележащим отложениям, картируется второй сейсмоакустический комплекс (САК 2).

В стратиграфическом отношении САК 1 отнесен к морским четвертичным осадкам (mQ), САК 2 – к отложениям верхненутовской подсвиты (N2nt2) раннеплиоценового возраста. На всех временных сейсмоакустических разрезах прослеживаются зоны газопроявлений, приуроченных к плиоцен-четвертичным отложениям.

По мощности отложений первого сейсмоакустического комплекса площадка делится на две зоны: северо-западную, где мощность САК 1 варьирует от 18 до 23 м, и юго-восточную, где она существенно меньше – от 3 до 8 м. Зоны разделяются палеоуступом высотой около 10 м (рис. 3). По характеру и очертаниям он, вероятно, представляет собой погребенный абразионный берег палеозалива. В литологическом отношении комплекс представлен в основном песчано-супесчаными отложениями с прослоями суглинков, галечного и гравийного материала. Мощность его по данным непрерывного сейсмоакустического профилирования не установлена. Во вскрытой скважиной части разреза он представлен слабо литифицированными суглинками и песчано-супесчаными отложениями.

На временном сейсмоакустическом разрезе обнаруженные палеоврезы выражаются в форме внедренной в нижележащий комплекс линзы с плоской субгоризонтальной кровлей (рис. 4). Прослеживаются палеоврезы на двух отработанных профилях, расположенных в юго-западной части площадки инженерногеологических изысканий. Расстояние между этими профилями при проведении НСП составляло 200 м.

Обнаруженные палеоврезы могут оказать негативное влияние на строительство инженерных сооружений и постановку буровой платформы по двум причинам: во-первых, они заполнены неконсолидированными грунтами с ослабленными несущими характеристиками, а во-вторых, внутренняя структура палеоврезов по характеру сейсмической записи свидетельствует о наличии газа в грунтах. Признаки газовых аномалий, проявляющиеся на сейсмических разрезах, рассмотрены в работах [Гайнанов, 2008; Хилтерман, 2010; Games, 2012; Games, Self, 2017; Сох et al., 2021]. К таким признакам относится «яркое



Рис. 2. Пример интерпретации сейсмоакустического разреза, показывающий сейсмоакустические комплексы и зоны газопроявлений в верхней части разреза.

Fig. 2. Example of interpretation of a seismoacoustic section, which shows the seismoacoustic complexes (CAK 1, CAK 2), reflective boundaries (light green) and the zones of gas manifestations (purple) in the upper part of the section. CB – north east, IO3 – south west.



Рис. 3. Пример интерпретации сейсмоакустического разреза, показывающий зоны газопроявлений и палеоуступ дочетвертичных отложений в верхней части разреза.

Fig. 3. Example of interpretation of a seismoacoustic section, which shows the zones of gas manifestations and palaeostep (subvertical blue line) of pre-Quaternary deposits in the upper part of the section. Other notationa see in Fig. 2.



Рис. 4. Примеры интерпретации сейсмоакустических разрезов, показывающие палеоврезы. **Fig. 4.** Examples of interpretation of seismoacoustic sections showing paleo-incisions (arrow with «палеоврез»).

пятно», инвертирование отраженных сигналов, прогибание осей синфазности и «зона тени». Обнаруженные придонные газовые зоны могут представлять опасность при проходке буровой колонны в верхней части геологического разреза ввиду возможного непроизвольного выброса углеводородов, что может причинить вред буровому оборудованию и водным биологическим ресурсам. Если даже не произошел взрывной выброс с непосредственной аварией буровой платформы, то постепенная утечка газа может привести к падению давления внутри пластов и, как следствие, к оседанию грунта. Если же здесь окажется одна из опор буровой платформы, то авария неизбежна.

Итогом работы является карта геологических опасностей в пределах площадки инженерно-геологических изысканий (рис. 5).



Рис. 5. Карта геологических опасностей площадки инженерно-геологических изысканий.

Fig. 5. Map of geological hazards of the site of engineering and geological surveys (highlighted: green-grey – gas zones, red – paleo-incisions).

Заключение

В пределах изученной площадки инженерно-геологических изысканий по результатам непрерывного сейсмоакустического профилирования были обнаружены зоны газопроявлений и палеоврезы. Более того, грунты палеоврезов обогащены, вероятно, газом.

Для поисков палеоврезов и придонных газовых зон в прибрежной части акватории оптимальным инженерно-геофизическим методом является непрерывное сейсмоакустическое профилирование, которое хорошо себя зарекомендовало на изучаемой площадке, что подтверждено фактическими материалами, приведенными в данной статье, а также полученными в морских экспедициях с участием автора на других прибрежных площадках Охотского моря. По итогам интерпретации сейсмоакустических разрезов составлена карта геологических опасностей изученной территории.

Выявленные геологические опасности – палеоврезы и газовые зоны – необходимо учитывать при дальнейшем бурении скважин и строительстве инженерных сооружений во избежание аварий и экологических катастроф.

Список литературы

1. Акуличев В.А., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б., Мальцева Е.В., Гресов А.И., Телегин Ю.А. **2014.** Условия формирования газогидратов в Охотском море. *Доклады Академии наук*, 454(3): 340–342. http://doi.org/10.7868/S0869565214030165

2. Богоявленский В.И., Керимов В.Ю., Ольховская О.О., Мустаев Р.Н. **2016.** Повышение эффективности и безопасности поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа на акватории Охотского моря. *Территория Нефтегаз*, 10: 24–32.

3. Веселов О.В., Гордиенко В.В., Куделькин В.В. **2006.** Термобарические условия формирования газогидратов в Охотском море. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*, 4: 42–65.

4. Гаврилов А.А. **2009.** Роль разрывных нарушений в формировании береговых линий Охотского и Японского морей (ст. 1. Региональный аспект исследований). *Геоморфология*, 3: 38–49. https://doi.org/10.15356/0435-4281-2009-3-38-49

5. Гайнанов В.Г. **2008.** О природе ярких пятен на временных разрезах сейсмоакустического профилирования. *ГЕОразрез*, 2: 1–18.

6. Голубин С.И., Савельев К.Н., Новиков А.Н. **2019.** Оценка геологических опасностей при эксплуатационном мониторинге объектов морских месторождений шельфа острова Сахалин. *Газовая промышленность*, S1 (782): 30–35.

7. Дзюбло А.Д., Воронова В.В., Перекрестов В.Е. **2019.** Исследование приповерхностного газа шельфа о. Сахалин и минимизация рисков при строительстве морских скважин. *Вестник Ассоциации буровых подрядчиков*, 3: 20–25.

8. Иванов Г.И., Казанин А.Г., Саркисян М.В., Ланцев В.В., Некрылов Н.Т., Ионов В.Ю., Павлов С.П., Макаров Е.С. **2016.** Сейсмика высокого разрешения – новый шаг вперед при изучении опасных геологических процессов. *Нефть. Газ. Новации*, 1: 65–68.

9. Казанин А.Г., Казанин Г.С., Иванов Г.И., Саркисян М.В. **2016.** Инновационные технологии при выполнении инженерно-геологических работ на арктическом шельфе России. *Научный журнал Российского газового общества*, 4: 25–30.

10. Калинин А.В. **1965.** Аппаратура и методика сейсмоакустической разведки для инженерно-геологических изысканий на море: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова.

11. Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л. **1983.** Сейсмоакустические исследования на акваториях. М.: Недра, 204 с.

12. Керимов В.Ю., Сизиков Е.А., Синявская О.С., Макарова А.Ю. **2015.** Условия формирования и поиски залежей УВ в турбидитовых коллекторах Охотского моря. *Нефть, газ и бизнес*, 2: 32–37.

13. Лексин В.К. **2020.** Применение сейсморазведки высокого разрешения для поисков локальных газовых аномалий на Южно-Киринском месторождении. *Геосистемы переходных зон*, 4 (4): 384–392. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.384-392

14. Лексин В.К., Самарин В.И., Лисковый П.Н. **2018.** Результаты интерпретации сейсмических разрезов при инженерных изысканиях в пределах Южно-Киринского нефтегазоконденсатного месторождения (шельф о. Сахалин). Инженерные изыскания, 9–10: 64–73.

15. Миронюк С.Г., Маркарьян В.В., Шельтинг С.К. **2013.** Опыт комплексной оценки и крупномасштабного инженерно-геологического районирования северо-восточного шельфа Черного моря по геологической опасности для строительства линейных объектов. *Инженерные изыскания*, 13: 48–59. 16. Миронюк С.Г., Росляков А.Г., Семенова А.А., Шарипов М.Ш. **2017.** Использование высокоразрешающей сейсморазведки для выявления геологических опасностей в различных геоморфологических зонах Черного моря. *Инженерные изыскания*, 1: 54–60.

17. Новиков А.А. **2018.** Специфика проведения комплексных морских инженерных изысканий и оценка опасностей геологических процессов под объекты подводного добычного комплекса шельфовых месторождений Киринского блока о. Сахалин. *Газовая промышленность*, 9: 42–48.

18. Петренко В.Е., Оганов Г.С., Свиридова Т.А. **2017.** Приповерхностный газ: риски и варианты технико-технологических решений при проектировании строительства скважин на морском шельфе. *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*, 2: 21–27.

19. Пивоваров Б.Л. **1970.** Исследование динамических и кинематических характеристик упругих волн в поглощающих средах применительно к задачам сейсмоакустики: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова.

20. Рыбальченко В.В., Гоговенков Г.Н., Слепченко В.С. **2017.** Вертикальная миграция газа и газогидраты на северо-восточном шельфе Сахалина. *Геология нефти и газа*, 2: 38–51.

21. Хилтерман Ф.Дж. **2010.** *Интерпретация амплитуд в сейсморазведке*. Тверь: Издательство ГЕРС, 256 с.

22. Cox D.R., Huuse M., Newton A.M.W., Sarkar A.D., Knutz P.C. **2021.** Shallow gas and gas hydrate occurrences on the northwest Greenland shelf margin. *Marine Geology*, 432(1): 106382. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106382

23. Games K.P. **2012**. Shallow gas detection. Why HRS, why 3D, why not HRS 3D? *First Break*, 30(10): 67–75.

24. Games K.P., Self E. **2017**. HRS 3D data – a fundamental change in site survey geohazard interpretation. *First Break*, 35(3): 39–48.

References

1. Akulichev V.A., Obzhirov A.I., Shakirov R.B., Maltseva E.V., Gresov A.I., Telegin Yu.A. **2014.** Conditions of gas hydrate formation in the Sea of Okhotsk. *Doklady Earth Sciences*, 454(1): 94–96. https://doi.org/10.1134/s1028334x14010164

2. Bogoyavlensky V.I., Kerimov V.Yu., Olkhovskaya O.O., Mustaev R.N. **2016.** Improving the efficiency and safety prospecting, exploration and development of oil and gas in the Sea of Okhotsk. *Territoriya Neftegaz* [*Oil and Gas Territory*], 10: 24–32. (In Russ.).

3. Veselov O.V., Gordienko V.V., Kudelkin V.V. **2006.** [Thermobaric conditions for the formation of gas hydrates in the Sea of Okhotsk]. *Geology and Mineral Resources of World Ocean*, 4: 42–65. (In Russ.).

4. Gavrilov A.A. **2009.** The role of faults in the formation of the coastlines of the Okhotsk Sea and Sea of Japan (paper 1. Regional aspect of studies). *Geomorfologiya*, 3: 38–49. (In Russ.). https://doi.org/10.15356/0435-4281-2009-3-38-49

5. Gaynanov V.G. **2008.** On the nature of bright spots on time sections of seismoacoustic profiling. *GEOsection*, 2: 1–18. (In Russ.).

6. Golubin S.I., Saveliev K.N., Novikov A.N. **2019.** [Estimation of geological hazards in the operational monitoring of offshore fields of Sakhalin Island]. *Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry Magazine*, S1(782): 30–35. (In Russ.).

7. Dzyublo A.D., Voronova V.V., Perekrestov V.E. **2019.** [Research shallow gas of Sakhalin shelf and minimize risks during offshore wells construction]. *Vestnik Assotsiatsii burovykh podryadchikov = Bull. of the Association of Drilling Contractors*, 3: 20–25. (In Russ.).

8. Ivanov G.I., Kazanin A.G., Sarkisyan M.V., Lantsev V.V., Nekrylov N.T., Ionov V.Yu., Pavlov S.P., Makarov E.S. **2016.** [High-resolution seismics – a new step forward in the study of geological hazards]. *Neft'*. *Gaz. Novatsii.* [*Oil. Gas. Innovations*], 1: 65–68. (In Russ.).

9. Kazanin A.G., Kazanin G.S., Ivanov G.I., Sarkisyan M.V. **2016.** Innovative technologies in performing engineering and geological works on the Arctic shelf of Russia. *Scientific J. of the Russian Gas Society*, 4: 25–30. (In Russ.).

10. Kalinin A.V. **1965.** [Equipment and methods of seismoacoustic exploration for engineering and geological offshore surveys]: [extended abstract of diss. ... cand. of Phys. and Math. sciences]. Moscow: Moscow State University. (In Russ.).

11. Kalinin A.V., Kalinin V.V., Pivovarov B.L. **1983.** [Seismoacoustic studies in water areas]. Moscow: Nedra, 204 p. (In Russ.).

12. Kerimov V.Y., Sizikov E.A., Sinyavskaya O.S., Makarova A.Y. **2015.** The conditions of the formation and the searching of hydrocarbon deposits in the turbidite reservoirs on the Okhotsk offshore. *Neft'*, *gaz i biznes* [*Oil, Gas and Business*], 2: 32–37. (In Russ.).

13. Leksin V.K. **2020.** Application of high resolution seismic to search for local gas anomalies in the South Kirinskoye oil and gas condensate field. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 384–392. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.384-392

14. Leksin V.K., Samarin V.I., Liskovyi P.N. **2018.** Results of interpretation of seismic during engineering surveys within of the South-Kirinskoye oil and gas condensate field (shelf of Sakhalin Island). *Inzhenernye izyskaniya* = *Engineering Survey*, 12(9–10): 64–73. (In Russ.).

15. Mironyuk S.G., Markaryan V.V., Shelting S.K. **2013.** Experience of integrated assessment and large-scale engineering-geological zoning of the north-eastern shelf of the Black Sea on geohazards for construction of linear objects. *Inzhenernye izyskaniya = Engineering Survey*, 13: 48–59. (In Russ.).

16. Mironyuk S.G., Roslyakov A.G., Semenova A.A., Sharipov M.S. **2017.** Using high-resolution seismics for identification of geological hazards in various geomorphological zones of the Black Sea. *Inzhenernye izyskaniya* = *Engineering Survey*, 1: 54–60. (In Russ.).

17. Novikov A.A. **2018.** Specifics of the integrated offshore geotechnical investigations and estimation of geological hazards for objects of the subsea production system of the offshore fields of Kirinsky block of Sakhalin Island. *Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry Magazine*, 9: 42–48. (In Russ.).

18. Petrenko V.E., Oganov G.S., Sviridova T.A. **2017.** Shallow gas: risks and variants of technical-technological solutions when projecting construction of offshore wells. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa = Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*, 2: 21–27. (In Russ.).

19. Pivovarov B.L. **1970.** [Investigation of dynamic and kinematic characteristics of elastic waves in absorbing media in relation to the problems of seismic acoustics]: [extended abstract of diss. ... cand. of Geol. and Miner. sciences]. Moscow: Moscow State University. (In Russ.).

20. Rybalchenko V.V., Gogonenkov G.N., Slepchenko V.A. **2017.** Vertical gas migration and gas hydrates in the northeast shelf of Sakhalin. *Oil and Gas Geology*, 2: 38–51. (In Russ.).

21. Hilterman F.J. **2010.** *Interpretation of amplitudes in seismic exploration.* Tver: Publ. House of the GERS, 256 p. (In Russ.). (Transl. from: Hilterman F.J. **2001.** Seismic amplitude interpretation. Society of Exploration Geophysicists, 236 p.).

22. Cox D.R., Huuse M., Newton A.M.W., Sarkar A.D., Knutz P.C. **2021.** Shallow gas and gas hydrate occurrences on the northwest Greenland shelf margin. *Marine Geology*, 432(1): 106382. https://doi.org/10.1016/j. margeo.2020.106382

23. Games K.P. **2012.** Shallow gas detection. Why HRS, why 3D, why not HRS 3D? *First Break*, 30(10): 67–75.

24. Games K.P., Self E. **2017.** HRS 3D data – a fundamental change in site survey geohazard interpretation. *First Break*, 35(3): 39–48.

Об авторе

ЛЕКСИН Василий Константинович (https://orcid. org/0000-0003-2635-9882), руководитель группы морских изысканий, ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», Южно-Сахалинск, lex-vasya@mail.ru LEKSIN Vasilii K. (https://orcid.org/0000-0003-2635-9882), Marine Survey Team Leader, RN-SakhalinNIPImorneft Limited Liability Company, Yuzhno-Sakhalinsk, lex-vasya@mail.ru

About the Author

УДК 551.465

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.328-338

Особенности волнения в южной части Охотского моря – акватории маршрутов водного транспорта к южным Курильским островам

© 2021 Д. П. Ковалев*, П. Д. Ковалев, А. С. Борисов, К. В. Кириллов

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: d.kovalev@imgg.ru

Резюме. Описаны результаты изучения в 2009–2010 гг. волнения в южной части Охотского моря в местах морских трасс между островами Сахалин и Итуруп с использованием автономных регистраторов волнения. Исследования проведены в целях повышения безопасности морской транспортной системы. Исходя из режима волнения и метеоусловий, циклон любого направления, подходящий к южной части Охотского моря, вызывает в рассматриваемой акватории и у берегов о. Итуруп волнение с высотами волн более 1.7 м. Но если циклон подходит к о. Сахалин с северозапада, то высота ветровых волн и зыби в прибрежной полосе юга – востока острова мала, и здесь существует возможность для судов укрыться от шторма. Анализ длинных волн с периодами приливных гармоник от 4 ч и больше показал, что они имеют практически одинаковую фазу колебаний у обоих островов. Проанализированы внутренние волны, обусловленные местными для каждой прилежащей акватории особенностями батиметрии и рельефа прибрежной зоны. Выявлены поверхностные гравитационные волны с периодом около 2.8 ч, которые присутствуют в Курильском и Куйбышевском заливах и с периодом 2.4 ч вблизи с. Охотское о. Сахалин. Показано, что наибольшей добротностью в районе Курильска обладает резонансная акватория для периодов 4.5 мин и можно ожидать явление тягуна при шторме на море.

Ключевые слова: инфрагравитационные волны, колебания уровня моря, приливы, ветровые волны и зыбь, внутренние волны, сейши, циклоны

Wave characteristics in the southern part of the Sea of Okhotsk – the area of water transport routes to the southern Kuril Islands

Dmitry P. Kovalev*, Peter D. Kovalev, Alexander S. Borisov, Konstantin V. Kirillov

Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: d.kovalev@imgg.ru

Abstract. This paper describes the results of studying the waves in the southern part of the Sea of Okhotsk on the sea routes between Sakhalin and Iturup islands by means of autonomous wave recorders. The study was performed in order to improve the safety of the maritime transport system. Analysis of the wave regime and weather conditions in the southern part of the Sea of Okhotsk, has shown that a cyclone of any direction approaching the southern part of the Sea of Okhotsk, causes sea waves with heights of more than 1.7 meters in the considered water area and nearshore of Iturup Island. However, if a cyclone approaches Sakhalin Island from the northwest direction, the height of wind waves and swell in the coastal area of the southeast of the island is small, and here is an opportunity for ships to take shelter from the storm. The analysis of long waves with tidal harmonic periods of 4 hours and more has shown, that they have almost the same oscillation phase for both islands. The internal waves caused by the local features of bathymetry and relief of the coastal zone for each adjacent water area are analyzed. Surface gravitational waves with a period of about 2.8 hours were detected at Kuibyshevsky and Kurilsky bays, and waves with a period of 2.4 hours were detected near the Okhotskoye village at Sakhalin Island. It is shown that the highest Q-factor in the Kurilsk region has the resonant water area for the periods of 4.5 minutes. It is noted that for these waves the phenomenon of a tyagun (harbour oscillations) can be expected during a storm at sea.

Keywords: infragravity wave, sea route, sea level fluctuations, tides, wind wave and swell, internal wave, seiches, cyclones

Для цитирования: Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С., Кириллов К.В. Особенности волнения в южной части Охотского моря – акватории маршрутов водного транспорта к южным Курильским островам. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 4, с. 328–338. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.328-338

Благодарности и финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.

Введение

Изучение волнения в южной части Охотского моря – акватории между островами Сахалин, Хоккайдо, Кунашир и Итуруп – представляет интерес в связи с хозяйственной деятельностью в этом регионе. Здесь пролегают маршруты грузовых и пассажирских судов, связывающих Курильские острова с о. Сахалин и Азиатским континентом.

Район Южных Курильских островов богат рыбой, биоресурсами, поэтому здесь ведется достаточно активный их промысел. Информация о температурном режиме и внутренних волнах в районе необходима рыболовецким судам. Кроме того, знание температуры воды вблизи берегов позволяет правильно организовать добычу придонных биоресурсов, таких как морской еж и гребешок.

Тем не менее волнение и его связь с метеоусловиями в южной части Охотского моря все еще недостаточно изучены. В лоции Охотского моря [2011] отмечается, что укрытых якорных мест в Охотском море мало. В большинстве бухт и заливов суда имеют возможность укрываться лишь от ветров с берега, а при других ветрах они вынуждены уходить штормовать в море. Поэтому данные о том, при каких ветрах и где суда могут укрываться от шторма, также необходимы. Кроме того, в статье рассмотрен вопрос о возможном воздействии на суда, стоящие на якорной стоянке у берегов, такого опасного явления, как тягун, которое может приводить даже к обрыву якорных цепей.

Учитывая значимость рассматриваемой части Охотского моря для практической деятельности, авторами проведено изучение поверхностных гравитационных и внутренних волн в акватории моря между островами Сахалин и Итуруп с использованием автономных регистраторов волнения АРВ-К12. Это позволило сделать существенные выводы о приливных режимах, ветровых волнах и зыби, проанализировать метеоусловия, при которых наблюдается штормовое волнение. *For citation:* Kovalev D.P., Kovalev P.D., Borisov A.S., Kirillov K.V. Wave characteristics in the southern part of the Sea of Okhotsk – the area of water transport routes to the southern Kuril Islands. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 328–338. (In Russ., abstr. in Engl.).

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.328-338

Acknowledgements and Funding

The work was carried out within the framework of state assignment of the Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk

Результаты и обсуждение

1. Наблюдения

Для изучения волнения в южной части Охотского моря использовались результаты измерений волнения и температуры, полученные в 2009–2010 гг. с помощью измерителей волнения APB-K12, расположенных вблизи с. Охотское, на юго-восточном побережье о. Сахалин, и вблизи населенного пункта Курильск, на западном берегу о. Итуруп (рис. 1). Расстояние между пунктами составляет примерно 407 км.

Вблизи Курильска (о. Итуруп) был установлен прибор на глубине около 5 м, измерение волнения проводилось с 1 июля по 22 декабря 2009 г. В с. Охотском (о. Сахалин) прибор был установлен на глубине около 1.7 м, измерения проводились с 28 октября 2009 по 7 марта 2010 г. Таким образом, синхронная регистрация осуществлялась с 28 октября по 22 декабря 2009 г., т.е. почти два месяца. Дискретность обоих измерений составляла 1 с.

На рис. 2 представлены полученные временные серии и их текущие спектры для времени синхронной регистрации на обоих приборах. На рядах колебаний уровня хорошо видны суточные и полусуточные приливы. При этом их величина в обоих пунктах наблюдения была примерно одинаковой и для суточного прилива достигала 1.5 м. Также видно,



Рис. 1. Карта южной части Охотского моря. Показаны места расположения измерителей волнения и маршрут водного транспорта Корсаков–Курильск.

Fig. 1. Map of the southern part of the Sea of Okhotsk. The locations of the wave gauges and the route of water transport Korsakov-Kurilsk are shown.



Рис. 2. Временные серии наблюдений за колебаниями уровня моря и их текущие спектры для времени синхронной регистрации в обоих пунктах.

Fig. 2. Time series of observations of sea level fluctuations and their current spectra for synchronous registration time at both points.

что за время наблюдений в рассматриваемом районе наблюдалось несколько штормов с высотой волн в Курильске до 2.3 м и в Охотском до 1.5 м.

2. Колебания уровня с приливными периодами

Текущие спектры (рис. 2) построены для диапазона периодов 0.5-30 ч, поскольку на более коротких периодах невозможно ожидать связи между волновыми процессами в пунктах наблюдения. Поэтому особенности более короткопериодного волнения будут рассмотрены ниже. На текущих спектрах (рис. 2), так же как и на временных сериях, хорошо выделяются максимумы, соответствующие суточным M_1 (24.84 ч) и полусуточным мелководным приливам M_2 (12.42 ч).

Поскольку текущие спектры позволяют проследить общую тенденцию изменения волнения во времени, но не позволяют с достаточной точностью определить периоды максимумов, для этого же диапазона периодов были рассчитаны спектры и взаимно-спектральные функции – когерентность и фаза (рис. 3). Они позволили уточнить периоды пиков, соответствующих волновым процессам. Эти периоды сведены в таблицу. Там же приведены периоды гармоник в соответствии с [Parker, 2007]. Кроме того, в спектрах, рассчитанных по данным вблизи пункта Охотское, наблюдаются пики на более коротких периодах – около 1.03, 1.15, 1.31, 1.5, 1.72, 2.0 и 2.32 ч.

Из таблицы следует, что эти пики в спектрах обеих записей соответствуют приливным гармоникам. При этом, как видно из поведения фазы на рис. 3, для суточной, полусуточной и с периодами 2.8, 4.12, 4.83 ч приливных гармоник разность фаз прихода волн в оба пункта наблюдения нулевая, что означает одновременное наступление прилива. Для гармоник с периодами 8.17 и 6.0 ч фаза составляет –0.27 (–15 град) и 0.38 (21.8 град) радиан соответственно.

Заметим, что когерентность для рассмотренных гармоник более 0.5 и превышает доверительный интервал, равный 0.4. В спектрах на рис. 3 выделяется пик с периодом около 2.8 ч, являющийся предположительно приливной гармоникой 2M2NK₉. Разность фаз для колебаний с этим периодом в пунктах наблюдения близка к нулю. Это свидетельствует о том, что данные колебания связаны между собой и проходят в Охотское и Курильск одновременно. Поскольку период достаточно короткий, мы проверили возможность принадлежности этого волнового процесса к сейшам.

Для измеренного по карте расстояния между Охотским и Курильском (примерно 407 км) и средней глубины Охотского моря 821 м [Добровольский, Залогин, 1982], в предположении, что южная часть Охотского моря



Рис. 3. Спектры колебаний уровня в Курильске, Охотском (сплошные линии) и когерентность (красная линия), фаза (фиолетовая линия), рассчитанные по синхронным записям. Спектры, рассчитанные по всей длине временных рядов, выполнены пунктирными линиями.

Fig. 3. Spectra of sea level fluctuations in Kurilsk and Okhotskoye village (solid lines) and coherence (red line), phase (purple line), calculated from synchronous recordings. The spectra calculated along the entire length of the time series are made with dotted lines.

является бассейном, ограниченным о. Сахалин, о. Хоккайдо и островами Курильской гряды, были определены периоды собственных резонансных частот этой акватории по формуле Мериана для полуоткрытых прямоугольных бассейнов с длиной *L* и однородной глубиной *H* [Райхлен 1970; Рабинович, 1993]:

$$T_n = \frac{2L}{n\sqrt{gH}}$$
 для моды $n = 1, 2, 3, \dots$ (1)

Здесь д – гравитационное ускорение.

При этом для первой моды был получен период 2.5 ч. Учитывая, что глубина в южной части Охотского моря в районе о. Хоккайдо меньше средней глубины по Охотскому морю, перерасчет средней глубины рассматриваемой акватории показал, что периоду 2.8 ч соответствует глубина примерно 670 м.

Таким образом, беря во внимание приближения глубины и контура акватории, можно заключить, что рассматриваемые колебания с периодом 2.8 ч могут быть не только приливной гармоникой, но также и сейшей.

Обнаруженные колебания с периодами от 1.03 до 2.32 ч наблюдаются только в районе с. Охотское и вблизи Курильска не проявляются. Это, как уже выше отмечалось, указывает на их связь с местными топографическими и батиметрическими особенностями побережья в зал. Мордвинова вблизи с. Охотское. Длины этих волн, рассчитанные из выражения для периода [Кочин и др., 1963] $T = \sqrt{2\pi\lambda/g}$, где T – период волны, λ – длина волны, – достаточно большие, примерно от 4.4 до 10.8 км.

Хотя происхождение этих пиков заранее неизвестно, достаточно большой период и длина волны не позволяют предполагать, что они вызваны краевыми волнами, захваченными в прибрежном волноводе, как показывают наши исследования у юго-восточного побережья о. Сахалин [Kovalev, Squire, 2020; Squire, 2021]. Более вероятно, что они возникают в результате взаимодействия приливных гармоник с донным рельефом или являются шельфовыми сейшами и их гармониками.

Использование формулы Du Boys [Giese, 1987; Rabinovich, 2009] для профиля наклона

морского дна в районе с. Охотское h(x), где x – расстояние от берега, позволяет рассчитать периоды T_n *n*-й моды шельфовых сейш для n = 0, 1, 2, ... и линейного наклонного шельфа, простирающегося на расстояние L = 115 км от берега до глубины h = 100 м, для которого средний наклон составляет $\gamma \approx 8.7 \times 10^4$:

$$T_n = \frac{4}{2n+1} \int_0^L \frac{dx}{\sqrt{gh(x)}} = \frac{8}{2n+1} \sqrt{\frac{L}{g\gamma}}.$$
 (2)

Полученные значения периодов для нескольких первых гармоник показывают, что они соизмеримы с теми, которые наблюдаются в наших данных, учитывая, что предположение о линейно возрастающей глубине воды на прибрежном шельфе является приблизительным и батиметрические измерения в Охотском море грубо аппроксимированы.

3. Волновые процессы с периодами от 5 с до 40 мин

Рассмотрим диапазон более коротких колебаний уровня моря. Текущие спектры для этих колебаний с периодами от 5 с до 40 мин приведены на рис. 4. Сразу отметим, что рассчитанная функция когерентности показала, как и предполагалось, отсутствие связи между этими колебаниями для разных пунктов наблюдения из-за большого расстояния между ними. Видно также, что полученные текущие спектры значительно различаются. Подъемы энергии колебаний с течением времени в Курильске наблюдаются значительно чаще. Очевидно, что это происходит из-за более частых штормов в районе Курильска, а район Охотского с запада прикрывает большой остров.

Для пункта измерений в с. Охотское подьемы энергии на коротких периодах происходят реже и наблюдаются для зыби с периодами около 12 с и волн с периодами приблизительно 47 с, которые, вероятнее всего, относятся к инфрагравитационным (ИГ) волнам еще и потому, что их энергия возрастает исключительно во время штормов. Подъемы энергии колебаний уровня с периодами около 10 мин определяются краевыми и лики-волнами [Kovalev, Squire, 2020; Kovalev et al., 2020; Squire, 2021].

Таблица. Периоды (ч) пиков в спектрах, превышающие 95%-й доверительный интервал *Table*. Periods (h) of peaks in the spectra exceeding the 95% confidence interval

	M ₁	M ₂	MK ₃	S ₄	3KM ₅	M ₆	2M2NK ₉
Период гармоники	24.84	12.42	8.17	6.00	4.85	4.14	2.77
Охотское	24.75	12.37	8.17	6.00	4.83	4.12	2.80
Курильск	24.75	12.37	8.17	6.00	4.83	4.12	2.80

Ситуация с волнением на коротких периодах в районе Курильска значительно сложнее. Увеличение энергии волнения в шторм здесь наблюдается и для ветровых волн с периодами от 5 с, и на периодах волн зыби до 12 с. Хорошо видны подъемы энергии, особенно в шторм, на периодах ИГ волн – 25 и 45 с.

Также в текущем спектре для пункта измерений в Курильске выделяются подъемы энергии на периодах 4.5, 6.77, 8.73, 11.22, 19.7 мин и слабый пик на 29.5 мин. Проведенный по формуле Мериана (1) расчет показал, что периоды сейш для акваторий Курильского и Куйбышевского заливов и для их общей акватории между мысом Пржевальского и п-овом Чирип близки к периодам наблюдаемых пиков в спектрах уровня от 4.5 до 29.5 мин. Таким образом, можно заключить, что наблюдаемые волновые процессы являются сейшами прибрежной к Курильску акватории и отражают особенности прибрежного рельефа и батиметрии. При этом наибольшей добротностью обладает резонансная акватория для периодов 4.5 мин. Колебания с таким периодом могут генерироваться в обоих рассматриваемых заливах, и, вероятно, поэтому резонансные особенности на периоде 4.5 мин наиболее выражены. Возможность связи резонанса двух заливов, повидимому, подтверждает диапазон периодов от 3.8 до 5 мин в нижней части пика на спектре.

Поскольку основной характеристикой прибрежной акватории, показывающей возможность усиления приходящих в нее волн с периодом, близким к резонансному, является добротность, был выполнен ее расчет для резонансной акватории вблизи Курильска с использованием полученных спектров, основываясь на том, что добротность определяет относительную величину резонансного максимума в энергетическом спектре колебаний [Зернов, Карпов, 1972] и если система обладает достаточно высокой добротностью, то она определяется выражением

$$Q = \omega_0 / \Delta \omega , \qquad (3)$$

где ω_0 – резонансная частота системы (резонансного максимума), $\Delta \omega$ – ширина максимума, а Q – его добротность.

При этом ширина максимума определяется как полоса частот, в пределах которой энергия колебаний уменьшается в 2 раза [Зернов, Карпов, 1972]. Расчет показал, что значение добротности рассматриваемой резонансной акватории равно 10.2.



Рис. 4. Текущие спектры колебаний уровня для периодов диапазона 5 с – 40 мин.

Fig. 4. Current spectra of level fluctuations for 5 s - 40 min periods range.

Максимальное (резонансное) значение амплитуды вынужденных колебаний можно определить из выражения [Зернов, Карпов, 1972]

$$A_{pe3} = A_{_{6H}}\omega_0^2 / 2\delta \sqrt{(\omega_0^2 - \delta^2)}, \qquad (4)$$

где δ – коэффициент затухания ($\delta = \omega_0 / 2 Q$), ω_0 – резонансная частота системы, $A_{\rm BH}$ – амплитуда приходящей волны. Расчет показывает, что приходящая в резонансную акваторию волна может максимально увеличиться примерно в 10 раз.

Согласно выводам работы [Рабинович, 1993], на периодах 0.5–6 мин, а иногда и до 20 мин возможно развитие явления тягуна. Оно вызывает сильные возвратно-поступательные движения воды, которые в свою очередь могут приводить к подвижке и повреждению судов, обрыву якорей и швартовых. Учитывая то, что рассматриваемый нами период 4.5 мин относится к диапазону периодов существования тягуна, а также высокую добротность резонансной акватории, судам, стоящим на рейде в Курильском и Куйбышевском заливах, можно ожидать воздействия этого явления при значительном волнении на море.

Отметим одну яркую особенность текущего спектра коротких волн (рис. 4), рассчитанного по наблюдениям вблизи Курильска, которая ранее нами не отмечалась. Хорошо видно значительное понижение энергии колебаний в полосе периодов от 53 до 77 с с хорошо выраженными краями. Эта полоса периодов располагается на низкочастотной границе диапазона существования ИГ волн, которые, как известно, образуются в результате нелинейного взаимодействия волн зыби.

Как показали рассчитанные спектры для синхронного времени измерения, представленные на рис. 5, колебания уровня в диапазоне волн зыби для Курильска отличаются от обычно регистрируемых, например, в Охотском наличием двух значимых пиков на периодах около 8.4 и 10.4 с. Третий пик на 6.1 с и другие на более коротких периодах относятся, скорее, к ветровым волнам. В диапазоне ИГ волн присутствуют только два пика на периодах 24.8 и 43.4 с и «провал» с минимумом на 70 с, который виден на текущем спектре. В то же время спектр по измерениям вблизи Охотского (рис. 5) содержит только один широкий подъем энергии в диапазоне волн зыби с центром на 11.8 с и множественными узкополосными волнами в диапазоне зыби, взаимодействие которых также создает большое число волн в диапазоне ИГ волн, близких по величине к 95%му доверительному интервалу и заполняющих полосу периодов вблизи 70 с. Хотя некоторое понижение уровня энергии на периодах около 70 с в нем также наблюдается, но оно не такое значительное, как для Курильска.

Анализ показал, что комбинационные гармоники волн зыби вблизи Курильска позволяют получить периоды 22.3 и 43.7 с, т.е. близкие к наблюденным пикам ИГ волн. Однако более длинные периоды из их комбинации получить невозможно, и только предполагаемое взаимодействие самих ИГ волн дает период 82.2 с, т.е. значительно больший, чем период наблюдаемого провала. И, видимо, такая ситуация и создает провал в спектре по измерениям вблизи Курильска. А двухпиковый спектр волн зыби связан, по-видимому, со сложной батиметрией в районе Курильска в отличие от почти прямолинейного уклона дна в районе Охотского.



Рис. 5. Спектры колебаний уровня моря для диапазона волн зыби и инфрагравитационных волн.

Fig. 5. Spectra of sea level fluctuations for swell and infragravity waves range.

4. Колебания температуры морской воды

Поскольку приборы, регистрирующие волнение на море, одновременно записывали и температуру воды, представляет интерес рассмотреть полученные ряды колебаний температуры в связи с возможностью проявления внутренних волн, которые оказывают значительное влияние на перемешивание вод. При этом во время синхронных наблюдений температура опускалась в Охотском с 9 °С до почти –2 °С, а в Курильске с 13 до 2°С. Временной ход температуры воды показан на рис. 6. Также отметим, что поскольку Охотское море, в том числе и рассматриваемая здесь акватория, в зимний период большей частью покрыто льдом [Лоция Охотского моря, 2011], то сравнивать температурные параметры будем с арктическими морями.

Для синхронного участка измерений температуры были рассчитаны спектры колебаний температуры и взаимно-спектральные характеристики – когерентность и фаза для разных диапазонов периодов колебаний. Все они показали, что связь между колебаниями температуры для всех периодов между пунктами наблюдений не отмечается. Также, судя по рассчитанным спектрам, колебания температуры с периодами короче примерно 6 мин носят шумовой характер и интереса не представляют. Для периодов длиннее 6 мин полученные спектры приведены на рис. 7.



Рис. 6. Временной ход температуры в пунктах наблюдения Охотское и Курильск.

Fig. 6. The time series of temperature in the Okhotskoye village and Kurilsk observations points.





Как видно из спектров, колебания температуры с приливными периодами отсутствуют. Это достаточно странно, поскольку обычно поперечные изобатные баротропные приливные течения генерируют внутренние приливы [Colosi, 2001]. Возможно, это связано с тем, что их величина в рассматриваемой акватории мала. Пики в спектрах температуры в основном присутствуют на периодах от 10 мин до 2.5 ч, причем в спектре, полученном по регистрации в районе Курильска, их больше. Однако все они лишь незначительно превышают 95%-й доверительный интервал, и существенно выраженных внутренних волн не обнаруживается. Для периодов короче 5 мин спектры не содержат пиков выше доверительного интервала, похожи на спектр шума и закон их спадания близок к степени -3. Заметим, что такой закон спадания спектра в работе [Levine et al., 1985] отмечается для внутренних волн с периодами короче 1 ч.

Пики в спектре записи в Курильске, превышающие доверительный интервал, проявляются на периодах 6.8, 18.9, 19.9, 20.9, 30.5, 33.4, 39.4, 80.7, 105.1, 131.2 и 195.3 мин. Закон спадания этого спектра близок к степени -2. Таков же закон спадания спектра внутренних волн для периодов от 1 до 10 ч по данным работы [Levine et al., 1985]. В спектре Охотского пики на периодах 9.9, 11.6, 22.8, 39.7, 80.0 и 88.4 мин. Однако спектр в этом случае спадает несколько круче, чем спектр Курильска. Из сравнения периодов пиков видно отсутствие их на совпадающих периодах между Курильском и Охотским, и можно заключить, что внутренние волны обусловлены местными для каждой прилежащей акватории особенностями батиметрии и рельефа прибрежной зоны.

Причины генерации наблюдаемых внутренних волн могут быть различными. Так, например, авторы [Zakharchuk, Darelius, 2009] полагают, что длинные гравитационные волны и шельфовые волны, которые существуют в виде вихрей [Darelius, 2009], в результате взаимодействия с островами, прибрежным рельефом и континентальным склоном могут порождать более короткие волновые процессы. В работе [Darelius, 2009] называется и другая причина генерации внутренних волн, а именно бароклинная неустойчивость. К сожалению, такие механизмы еще мало изучены и в настоящее время представляется затруднительным объяснить генерацию внутренних волн с периодами в несколько часов, которую мы наблюдаем.

Заметим, что генерация короткопериодных, с минутными периодами внутренних волн приливных течений, протекающих по мелководным берегам в теплое время года, при благоприятствовании топографических характеристик шельфа, была отмечена во многих других морях с определенными батиметрическими особенностями шельфа [Colosi, 2001; Duda, 2004; Lee, 1974].

Авторы настоящей работы допускают и другую, скорее совместную с рассмотренными выше, возможность генерации короткопериодных внутренних волн открытого моря циркуляцией Ленгмюра [Polton, 2008] над стратифицированной водой. При этом равномерное поверхностное ветровое напряжение и параллельное воздействие дрейфовой волны Стокса быстро создают турбулентный смешанный поток, который (поскольку инерционное движение отклоняется от ветра) генерирует высокочастотные внутренние волны в стратифицированной ниже жидкости. Такой вывод авторами сделан на основании сравнений диапазона периодов внутренних волн 2-20 мин, рассматриваемых в работе [Zakharchuk, 1985], и реально наблюдаемых периодов колебаний по нашим данным от единиц минут до 1 ч.

5. Воздействие метеоусловий на волнение

Представляет интерес проанализировать метеорологические условия над юго-восточной частью Охотского моря с целью определения факторов, влияющих на волнение в районах рассматриваемых пунктов наблюдения и по трассе с. Охотское – Курильск. Дело в том, что штормовое волнение не всегда одновременно присутствует в обоих пунктах наблюдения. Были выделены три синхронные ситуации волнения в с. Охотское и Курильске. Первая, когда штормовое волнение есть в районе обоих пунктов, но в Охотском волны выше и шторм начинается примерно на половину суток раньше (рис. 8 а), вторая, когда шторм есть и в Охотском, и Курильске (рис. 8 б), и третья, при которой шторм в Курильске, а в Охотском небольшое волнение (рис. 8 в). Ситуация, обратная третьей, когда в Охотском шторм, а в Курильске его нет, не наблюдалась. И ситуация с отсутствием штормов в обоих пунктах не рассматривалась из-за очевидности спокойной погоды во всем регионе.

Были проанализированы синоптические ситуации, соответствующие рассматриваемым фрагментам временных рядов.



Рис. 8. Фрагменты временных рядов колебаний уровня моря. Светлым тоном показаны фрагменты зарегистрированных временных рядов колебаний уровня, а темным – фрагменты с вычтенным предвычисленным приливом. Пояснения см. в тексте.

Fig. 8. Fragments of time series of sea level fluctuations. Fragments of the recorded time series of level fluctuations are shown in a light tone, and fragments with the subtructed precalculated tide are shown in a dark tone. See the text for explanations.

В первой ситуации (рис. 8 а, 9 а) 14 ноября 2009 г. область сильных ветров со скоростями более 30 м/с располагалась вблизи о. Сахалин близко к его южной оконечности. При этом над акваторией в районе Курильска скорость ветра составляла 10.8–11.1 м/с. Такое поле ветра в рассматриваемой части Охотского моря создавал перемещающийся с юга Японского моря вдоль азиатского континента циклон, центр которого 15 ноября находился в центре Японского моря (рис. 9 б). Но, несмотря на штормовое волнение в южной части Охотского с высотой волн до 2 м, скорость ветра у восточного побережья о. Итуруп не превышала 8.1 м/с.

Во второй ситуации (рис. 8 б) поле сильных ветров со скоростями ветра 21.0–21.3 м/с располагалось между островами Сахалин и Итуруп (рис. 10 а). Это поле ветров определял ци-



Рис. 9. Карта поверхностного ветра (а) за 14 ноября 2009 г. и карта облачности (б) за 15 ноября 2009 г. (по данным https://worldview. earthdata.nasa.gov/).

Fig. 9. Surface wind map (a) for November 14, 2009, and cloud cover map (b) for November 15, 2009. (date from https://worldview.earthdata.nasa.gov/).

клон, центр которого перемещался с юга в северо-восточном направлении над Тихим океаном вдоль Японских островов. При этом, судя по карте поверхностного ветра и наблюденным колебаниям уровня моря, штормовое волнение в Курильске достигало 1.5 м и присутствовало на всей акватории по трассе о. Сахалин – о. Итуруп.

В третьей ситуации (рис. 8 в) 12 декабря 2009 г. центр одного циклона располагался в Тихом океане на широте середины о. Хонсю на расстоянии от него примерно в 300 км и смещался на северо-восток, а 13 декабря – в Тихом океане на широте северной оконечности о. Хонсю на расстоянии от него около 1000 км. Но этот циклон сопровождался слабым волнением

в районе юга о. Сахалин. Второй циклон двигался с северо-запада и к 14 декабря подошел уже к мысу Терпения о. Сахалин. За время своего перемещения он сопровождался ветрами западного направления у о. Итуруп со скоростями 12.6–12.9 м/с и вызвал шторм в южной части Охотского моря с высотой волн до 1.7 м, начавшийся в Курильске 13 декабря и продолжавшийся до конца суток 15 декабря. Отметим, что при этом скорость ветра у восточного побережья о. Итуруп не превышала 8.4 м/с.

В то же время о. Сахалин прикрывал от ветров западного направления, сопровождающих второй циклон, свою прибрежную юговосточную часть, и поэтому на карте ветров (рис. 10 б) вдоль побережья острова на расстоянии примерно до 10 км от берега скорость ветра была 11.1–11.4 м/с, а на расстоянии 50 м от берега с. Охотское, где располагался при-

бор, наблюдалось слабое волнение с высотой волн 10–30 см.

Из рассмотренных синоптических ситуаций можно сделать вывод, что практически любой циклон любого направления, подходящий к южной части Охотского моря, вызывает там и у берегов о. Итуруп волнение с высотами волн более 1.7 м. Но если циклон подходит к о. Сахалин с северозападного направления, то высота волн в юго-восточной прибрежной полосе не превышает 30 см. При этом возможны работа рыбаков в прибрежной зоне и погрузо-разгрузочные работы порта Корсаков, а также укрытие судов.



Рис. 10. Карты поверхностного ветра за 6 декабря 2009 г. (а) и 14 декабря 2009 г. (б) (по данным https://worldview.earthdata.nasa.gov/).

Fig. 10. Surface wind maps for December 6, 2009 (a) and December 14, 2009 (b) (date from https://worldview.earthdata.nasa.gov/).

Заключение

Проведено детальное изучение волнения в южной части Охотского моря между островами Сахалин и Итуруп с использованием синхронных записей колебаний уровня моря – волнения и температуры морской воды с использованием автономных регистраторов волнения АРВ-К12, осуществляющих запись с секундной дискретностью. Приборы установлены вблизи с. Охотское (о. Сахалин) и Курильск (о. Итуруп).

Анализ приливного режима южной части Охотского моря показал, что длинные волны с периодами приливных гармоник от 2.8 ч и больше имеют практически одинаковую фазу колебаний у обоих островов и поэтому следует ожидать максимальной и минимальных вод одновременно в прибрежной зоне обоих островов.

Выявленные поверхностные гравитационные волны, предположительно приливной гармоники, с периодом около 2.8 ч, которые присутствуют в обоих пунктах наблюдения, были проверены на возможную их принадлежность к сейшам. С помощью формулы Мериана показано, что данные волны могут являться и первой модой сейшевых колебаний южной части Охотского моря – полуоткрытой резонансной акватории, ограниченной островами Сахалин, Хоккайдо, Кунашир и Итуруп.

С использованием приближенной модели линейного профиля наклона морского дна в районе с. Охотское и формулы Du Boys установлено, что обнаруженные вблизи о. Сахалин колебания с периодом 2.32 ч являются шельфовыми сейшами.

Проведенный анализ короткопериодных колебаний – от 3 с до 1 ч – для прибрежной акватории вблизи Курильска показал, что хорошо выделяющиеся в спектрах колебаний подъемы энергии, особенно в шторм на периодах волн, приблизительно равных 25 и 45 с,

связаны с инфрагравитационными волнами. Пики с минутными периодами обусловлены сейшевыми колебаниями для резонансных акваторий Курильского и Куйбышевского заливов и для их общей акватории между мысом Пржевальского и п-овом Чирип.

Установлено, что наибольшей добротностью обладает резонансная акватория для периодов 4.5 мин в районе Курильска. Колебания с таким периодом могут генерироваться

в обоих рассматриваемых заливах – Курильском и Куйбышевском, и, видимо, поэтому резонансные особенности на периоде 4.5 мин наиболее выражены. Поскольку рассматриваемый период 4.5 мин относится к диапазону периодов существования тягуна, а также учитывая высокую добротность резонансной акватории, можно ожидать воздействия этого явления на суда при значительном волнении на море и связанную с этим опасность для судов, стоящих в это время на рейде в Курильском и Куйбышевском заливах.

По рассчитанным спектрам колебаний уровня отмечена особенность волнения в диапазоне волн зыби для Курильска, которая характеризуется наличием двух значимых пиков на периодах около 8.4 и 10.4 с и отличается от обычных и часто наблюдаемых спектров, например, в Охотском. Такое волнение с двумя выраженными периодами может являться причиной «провала» в спектре на периодах около 70 с.

Анализ колебаний температуры воды показал, что пики в спектрах температуры в основном присутствуют на периодах от 10 мин до 2.5 ч, причем в спектре, полученном по регистрации в районе Курильска, их больше. Установлено также отсутствие колебаний с приливными периодами. Авторы настоящей работы допускают совместную с рассмотренными ранее возможность генерации короткопериодных внутренних волн открытого моря циркуляцией Ленгмюра над стратифицированной водой.

Исходя из особенностей режима волнения и метеоусловий в южной части Охотского моря, различные пути подхода циклона к исследуемым акваториям вызывают различный отклик в этих акваториях, от опасного волнения с условием прекращения работ до незначительного волнения, при котором возможна работа рыбаков в прибрежной зоне и проведение погрузо-разгрузочных работ.

Список литературы

1. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. 1982. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 192 с.

2. Зернов Н.В., Карпов В.Г. 1972. Теория радиотехнических цепей. Л.: Энергия, 816 с.

3. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. **1963.** *Теоретическая гидромеханика*. Ч. 1. Изд. 6. М.: Гос. издво физ.-мат. лит., 583 с.

4. *Лоция Охотского моря*. **2011.** Книга 1406, вып. 1, 57 с. URL: http://parusa.narod.ru/bib/books/fareast/1406-1.htm

5. Рабинович А.Б. **1993.** Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. Л.: Гидрометеоиздат, 325 с.

6. Райхлен Ф. **1970.** Резонанс гавани. В кн.: *Гидродинамика береговой зоны и эстуариев*: пер. с англ. Л.: С. 114–166.

7. Colosi J.A., Beardsley R.C., Lynch J.F., Gawarkiewicz G., Chiu C.S., Scotti A. **2001.** Observations of nonlinear internal waves on the outer New England continental shelf during the summer shelf break primer study. *J. of Geophysical Research: Oceans*, 106(C5): 9587–9601. https://doi.org/10.1029/2000jc900124

8. Darelius E., Smedsrud L.H., Osterhus S., Foldvik A., Gammelsrod T. **2009.** Structure and variability of the Filchner overflow plume. *Tellus A*, 61(3): 446–464. https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2009.00391.x

9. Duda T.F., Lynch J.F., Irish J.D., Beardsley R.C., Ramp S.R., Chiu C.S., Tang T.Y., Yang Y.-J. **2004.** Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern South China Sea. *IEEE J. of Oceanic Engineering*, 29(4): 1105–1130. https://doi.org/10.1109/joe.2004.836998

10. Giese G.S., Hollander R.B. **1987.** The relationship between coastal seiches at Palawan Island and tidegenerated internal waves in the Sulu Sea. *J. Geophysical Research: Oceans*, 92: 5151–5156. https://doi.org/10.1029/jc092ic05p05151

11. Kovalev D.P., Kovalev P.D., Squire V.A. **2020.** Crack formation and breakout of shore fast sea ice in Mordvinova Bay, south-east Sakhalin Island. *Cold Regions Science and Technology*, 175: 103082. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103082

12. Kovalev P.D., Squire V.A. **2020.** Ocean wave/sea ice interactions in the south-eastern coastal zone of Sakhalin Island. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 238: 106725. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106725

13. Lee C.Y., Beardsley R.C. **1974.** Generation of long nonlinear internal waves in a weakly stratified shear-flow. *J. of Geophysical Research*, 79(3): 453–462. https://doi.org/10.1029/jc079i003p00453

14. Levine M.D., Paulson C.A., Morison J.H. **1985.** Internal waves in the Arctic Ocean – Comparison with lower-latitude observations. *J. of Physical Oceanography*, 15: 800–809.

https://doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015<0800:iwitao>2.0.co;2

15. Parker B.B. 2007. Tidal analysis and prediction. NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3, 378 p.

16. Polton J.A., Smith J.A., MacKinnon J.A., Tejada-Martinez A.E. **2008.** Rapid generation of high-frequency internal waves beneath a wind and wave forced oceanic surface mixed layer. *Geophysical Research Letters*, 35(13602): 1–5. https://doi.org/10.1029/2008gl033856

17. Rabinovich A.B. **2009.** Seiches and harbour oscillations. In: Kim Y.C. (ed.) *Handbook of coastal and ocean engineering*. Singapore: World Scientific, p. 193–236. doi:10.1142/9789812819307_0009

18. Squire V.A., Kovalev P.D., Kovalev D.P., Zarochintsev V.S. **2021.** On the trapping of energy from storm surges on the coasts of the Sea of Okhotsk. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 250: 107136. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107136

19. Zakharchuk E.A. **1999.** Internal waves in the Laptev Sea. In: *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic Dynamics and History*. Springer, p. 43–51. https://doi.org/10.1007/978-3-642-60134-7_5

References

1. Dobrovol'skiy A.D., Zalogin B.S. 1982. Morya SSSR [Seas of the USSR]. M.: MGU Publ., 192 p.

2. Zernov N.V., Karpov V.G. **1972.** *Teoriya radiotekhnicheskikh tsepey* [*Theory of radioelectric circuits*]. Leningrad: Energiya, 816 p.

3. Kochin N.E., Kibel' I.A., Roze N.V. **1963.** *Teoreticheskaya gidromekhanika* [*Theoretical hydromechanics*]. Pt 1. 6th ed. Moscow: Gos. izd-vo fiz.-mat. lit., 583 p.

4. Lotsiya Okhotskogo morya [Sailing directions of Sea of Okhotsk]. 2011. Kniga 1406, Iss. 1, 57 p. URL: http://parusa.narod.ru/bib/books/fareast/1406-1.htm

5. Rabinovich A.B. **1993.** Dlinnye gravitatsionnye volny v okeane: zakhvat, rezonans, izluchenie [Long ocean gravity waves: Trapping, resonance, and leaking]. Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 325 p.

6. Raykhlen F. **1970.** [Harbor resonance]. In: *Gidrodinamika beregovoy zony i estuariev*. Leningrad, p. 114–166. (Transl. from English: A.T. Ippen (ed.). Estuary and coastline hydrodynamics. New York: McGraw-Hill Comp., 1966).

7. Colosi J.A., Beardsley R.C., Lynch J.F., Gawarkiewicz G., Chiu C.S., Scotti A. **2001**. Observations of nonlinear internal waves on the outer New England continental shelf during the summer shelf break primer study. *J. of Geophysical Research: Oceans*, 106(C5): 9587–9601. https://doi.org/10.1029/2000jc900124

8. Darelius E., Smedsrud L.H., Osterhus S., Foldvik A., Gammelsrod T. **2009.** Structure and variability of the Filchner overflow plume. *Tellus A*, 61(3): 446–464. https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2009.00391.x

9. Duda T.F., Lynch J.F., Irish J.D., Beardsley R.C., Ramp S.R., Chiu C.S., Tang T.Y., Yang Y.-J. **2004.** Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern South China Sea. *IEEE J. of Oceanic Engineering*, 29(4): 1105–1130. https://doi.org/10.1109/joe.2004.836998

10. Giese G.S., Hollander R.B. **1987.** The relationship between coastal seiches at Palawan Island and tidegenerated internal waves in the Sulu Sea. *J. Geophysical Research: Oceans*, 92: 5151–5156. https://doi.org/10.1029/jc092ic05p05151

11. Kovalev D.P., Kovalev P.D., Squire V.A. **2020.** Crack formation and breakout of shore fast sea ice in Mordvinova Bay, south-east Sakhalin Island. *Cold Regions Science and Technology*, 175: 103082. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103082

12. Kovalev P.D., Squire V.A. **2020.** Ocean wave/sea ice interactions in the south-eastern coastal zone of Sakhalin Island. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 238: 106725. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106725

13. Lee C.Y., Beardsley R.C. **1974.** Generation of long nonlinear internal waves in a weakly stratified shear-flow. *J. of Geophysical Research*, 79(3): 453–462. https://doi.org/10.1029/jc079i003p00453

14. Levine M.D., Paulson C.A., Morison J.H. **1985.** Internal waves in the Arctic Ocean – Comparison with lower-latitude observations. *J. of Physical Oceanography*, 15: 800–809.

https://doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015<0800:iwitao>2.0.co;2

15. Parker B.B. 2007. Tidal analysis and prediction. NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3, 378 p.

16. Polton J.A., Smith J.A., MacKinnon J.A., Tejada-Martinez A.E. **2008.** Rapid generation of high-frequency internal waves beneath a wind and wave forced oceanic surface mixed layer. *Geophysical Research Letters*, 35(13602): 1–5. https://doi.org/10.1029/2008gl033856

17. Rabinovich A.B. **2009.** Seiches and harbour oscillations. In: Kim Y.C. (ed.) *Handbook of coastal and ocean engineering*. Singapore: World Scientific, p. 193–236. doi:10.1142/9789812819307_0009

18. Squire V.A., Kovalev P.D., Kovalev D.P., Zarochintsev V.S. **2021.** On the trapping of energy from storm surges on the coasts of the Sea of Okhotsk. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 250: 107136. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107136

19. Zakharchuk E.A. **1999.** Internal waves in the Laptev Sea. In: *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic Dynamics and History*. Springer, p. 43–51.

Об авторах

КОВАЛЕВ Дмитрий Петрович (https://orcid.org/0000-0002-5184-2350), доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск,

d.kovalev@imgg.ru

КОВАЛЕВ Петр Дмитриевич (https://orcid.org/0000-0002-7509-4107), доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, p.kovalev@imgg.ru

БОРИСОВ Александр Сергеевич (https://orcid.org/0000-0002-9026-4258), кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, a.borisov@imgg.ru

КИРИЛЛОВ Константин Владиславович (https://orcid. org/0000-0002-0822-3060), научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, k.kirillov@imgg.ru KOVALEV Dmitry P. (https://orcid.org/0000-0002-5184-2350), Doctor of Physics and Mathematics, Leader of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, d.kovalev@imgg.ru

KOVALEV Petr D. (https://orcid.org/0000-0002-7509-4107), Doctor of Engineering, Leading Researcher of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, p.kovalev@imgg.ru

BORISOV Aleksandr S. (https://orcid.org/0000-0002-9026-4258), Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, a.borisov@imgg.ru

KIRILLOV Konstantin V. (https://orcid.org/0000-0002-0822-3060), Researcher of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, k.kirillov@imgg.ru

About the Authors

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.248.2,551.89

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.339-345

3D-моделирование эффекта гидроизостазии с близкой к реальной конфигурацией поверхности Мохо для Охотского моря

© 2021 Р. Ф. Булгаков

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

Резюме. Взаимосвязь между деформациями твердой поверхности Земли и изменениями уровня Мирового океана при смене ледниковых периодов межледниковьями изучается методами численного моделирования. При деформациях земной поверхности ожидается, что амплитуда деформаций будет зависеть от меняющейся по поверхности Земли мощности верхнего литосферного слоя. Учесть изменение мощности литосферного слоя возможно с применением 3D-моделирования. В данной работе выполнено 3D-моделирования явления гидроизостазии при морской трансгрессии, схожей с трансгрессиями межледниковий для Охотского моря. Сетка (mesh) построена на основе близкой к реальной батиметрии Охотского моря и конфигурации поверхности Мохо. Моделирование выполнено методом конечных элементов в программном пакете Elmer. В результате установлена связь между конфигурацией поверхности границы Мохо и амплитудой деформаций.

Ключевые слова: послеледниковая трансгрессия, вязкость мантии, гидроизостазия, вертикальные движения, Elmer, метод конечных элементов

3D modeling of the hydroisostasy effect with a configuration of Moho surface of the Sea of Okhotsk close to real

Rustam F. Bulgakov

Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia E-mail: r.bulgakov@imgg.ru

Abstract. Interrelation between global sea level changes during Glacial–Interglacial periods and Earth surface deformations is studied using digital simulation methods. During Earth surface deformations, the deformation amplitude is expected to depend on variable thickness of the upper lithospheric layer. 3D modeling allows to take into account thickness variation of the lithospheric layer. In this work, 3D modeling of hydroisostasy under marine transgression similar to Interglacial ones for the Sea of Okhotsk has been made with creating a mesh on the base close to real bathimetry of the Sea of Okhotsk and Moho surface configuration. Simulation has been done by finite element method by Elmer software suite. As a result, relation between Moho surface configuration and Earth surface deformation was found.

Keywords: postglacial transgression, mantle viscosity, hydroisostasy, vertical movements, Elmer, finite element method

Для цитирования: Булгаков Р.Ф. 3D-моделирование эффекта гидроизостазии с близкой к реальной конфигурацией поверхности Мохо для Охотского моря. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 4, с. 339–345. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.339-345

Благодарности

Автор выражает администраторам сайта "Elmer Discussion Forum" (http://www.elmerfem.org/forum/ viewforum.php?f=3) и его участникам искреннюю благодарность за методическую помощь по использованию программного пакета Elmer.

For citation: Bulgakov R.F. 3D modeling of the hydroisostasy effect with a configuration of Moho surface of the Sea of Okhotsk close to real. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 339–345. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.339-345

Acknowledgements

Author gratefully acknowledges the admins of Elmer Discussion Forum website (http://www.elmerfem. org/forum/viewforum.php?f=3) and its participants for the methodological assistance in using the Elmer software suite.
Введение

Изменения уровня океана в четвертичное время, вызванные формированием покровных ледников, достигали амплитуды в 120–130 м, что приводило к перераспределению нагрузки водной толщи на дно океанов и морей. Перераспределение водной нагрузки деформировало земную поверхность. Деформации земной поверхности вследствие изменения водной нагрузки известны как явление гидроизостазии. Деформации в результате гидроизостазии могут иметь заметные значения, до первых метров. В земных недрах они могут достигать нижней мантии.

Распределение деформаций, а следовательно, и поля напряжения, нужно ожидать, зависит от анизотропии реологических свойств мантийных слоев и мощности литосферы, имеющей свойства упругой «скорлупы» по отношению к мантии с вязко-упругими свойствами.

Изучение деформаций земной поверхности в результате меняющейся нагрузки ведется методами численного моделирования начиная с работ [Farell, Clark, 1976; Clark, Lingle, 1979; Peltier, 1974; и др.]. При этом, в силу планетарного масштаба явления и необходимости учета перераспределения водных масс, замерзающих или, наоборот, высвобождающихся из ледников, вращения планеты, гравитации, модель для расчета должна включать весь объем планеты. Для такой модели сложно учесть локальные неоднородности строения литосферы и мантийных слоев, поэтому обычно они принимаются однородными и с одинаковой мощностью для всей планеты. Нужно отметить, что появились работы с использованием метода конечных элементов (МКЭ), в которых учитываются вязкостные неоднородности в мантии для сферической формы Земли [Bartholet et al., 2021], но работ с учетом реальной топографии границы литосферы и мантии пока нет.

Однако при построении модели для ограниченного участка земной поверхности современных знаний о строении земных недр и современных, среднего уровня, вычислительных возможностей достаточно, чтобы учесть при моделировании неоднородности строения недр. Опыт моделирования явления гидроизостазии МКЭ был предварительно получен на 2D-модели [Булгаков, 2021].

В данной работе делается попытка построить трехмерную модель с учетом реальной батиметрии дна Охотского моря и реальной поверхности границы Мохо; моделировать деформации при нагружении по линейному закону в течение 17 000 лет дна водной толщей глубиной 120 м и затем, после мгновенного удаления нагрузки, моделировать релаксацию объема в течение 61 000 лет.

Модель для расчета

Для моделирования на основе данных батиметрии Торех (https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/ get_data.cgi) и границы Мохо из базы данных Crust 2.0 (https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2. html), адаптированных для охотоморского региона [Сеначин и др., 2013], была построена 3D-сетка (mesh) для расчета методом конечных элементов (МКЭ). Участок охотоморского региона был выбран в пределах координат 135°–165° в.д. и 42°–64° с.ш. (рис. 1).

Построение сетки (рис. 2) выполнялось В программных пакетах с открытым кодом и открытым доступом Salome (https:// salome-platform.org/) и FreeCAD (https://www. freecadweb.org/). Батиметрия и граница Мохо были взяты в проекции Меркатора с параметрами: нулевой меридиан 147° в.д., смещение от нулевого меридиана 16 345 951.83 м, от экватора 5 306 124.4959 м. Сетка представляет собой параллелепипед со сторонами по 50 000 км и глубиной 2891 км до границы земного ядра. В центральной части сетки – поверхности, построенные на основе данных о батиметрии и поверхности границы Мохо. Разрешение грида цифровой модели поверхностей взято 50 км. Избыточный объем был построен по сторонам куба центральной части для устранения влияния взаимодействия с боковыми границами модели. Центральная часть параллелепипеда представляет собой квадрат со сторонами по 2500 км (рис. 2). Моделирование в данном случае имеет некоторую аналогию с работой [Steffen et al., 2006], где для расчета также была построена 3D-сетка в виде параллелограмма со сторонами 130 000 км и высотой 2886 км. Но там для построения сетки использовались не реальная земная поверхность и поверхность Мохо, а плоские поверхности.

Сетка строилась в Salome после подготовки геометрии поверхностей батиметрии и границы Мохо в FreeCAD. В Salome для генерирования сетки использовалась опция "Gmsh" из известного программного продукта Gmsh (http://gmsh.info/), специально разработанного для генерирования мешей для анализа МКЭ. Элементы для сетки были выбраны quadratic tetrahedrals. Сетка содержит 678 923 узла и 128 493 элемента. Для достижения реального времени для расчета и уменьшения количества элементов сетки в сторону краев от центральной



Рис. 1. (а) Карта-схема Тихого океана. Полигон указывает расположение участка, взятого для моделирования. (b) Карта-схема района Охотского моря, ограниченного границами полигона.

Fig. 1. (a) Pacific Ocean sketch-map. A polygon shows the location of modeling area. (b) The Sea of Okhotsk sketch-map inside the polygon boundaries.



Рис. 2. (а) 3D-сетка, построенная для моделирования; (b) центральная часть 3D-сетки; (c) поверхность границы Мохо, использованная для построения 3D-сетки; (d) вид с южной стороны через центральную часть сетки: внизу поверхность Мохо, выше поверхность дна Охотского моря.

Fig. 2. (a) 3D mesh, used for modeling; (b) Central part of 3D mesh; (c) Moho surface used in 3D mesh constructing; (d) South view across the central part of the mesh: bottom of the view is Moho surface, top of the view is the Sea of Okhotsk bottom bathymetry.

Слой	Радиус, км	Мощность слоя, км	Плотность, кг/м ³	Коэфф. Пуассона	Модуль сдвига, ×10 ¹¹ Па	Вязкость, Па·с	Гравитация (ускорение свободного падения), м/с ²
Литосфера	6371–6321	7–50	2854.6	0.27	0.45	1.0×10^{44}	9.82
Верхняя мантия	6321–6151	170	3367.12	0.27	0.85	0.5×10^{21}	9.505
	6151–5971	180	3467.12	0.3	2.19	0.5×10^{21}	9.505
	5971-5701	270	3988.07	0.3	2.29	2.7×10^{21}	9.505
Нижняя мантия	5701-3480	2221	4396.56	0.49	6.5844	2.7×10^{21}	9.37

Таблица. Характеристики литосферы и мантии, принятые в работе для модели *Table.* Lithosphere and mantle characteristics taken for model simulation

части, а также по мере увеличения глубины размеры элементов сетки были увеличены.

Модель сетки была составлена из 5 слоев (см. таблицу).

Расчет

Расчет выполнялся в программном пакете с открытым кодом и в свободном доступе Elmer (https://www.csc.fi/web/elmer). Моделирование происходило в режиме течения времени (transient), временной шаг был установлен – 10 лет. Моделировали возрастание нагрузки на дно Охотского моря по линейному закону в течение 17 000 лет, симулируя поступление воды с повышением глубины моря на 120 м, затем мгновенное снятие нагрузки, после которого в течение 61 000 лет наблюдалась релаксация объема. Максвелловская среда мантийных слоев была принята несжимаемой. Для литосферы было установлено «запредельное» значение динамической вязкости 10⁴⁴ Па·с, что определяло поведение материала литосферы как упругого тела. При моделировании использовался предусмотренный в программном пакете математический инструментарий. Решение системы линейных уравнений деформации выполнялось итерациями обобщенного метода минимальных невязок (GCR) после применения предобуславливателей неполной факторизации Крылова (ILU2). Для дискретизации во времени использовался метод BDF (формула обратной дифференциации) второго порядка, обобщенный метод минимальных невязок (http://www.nic.funet.fi/pub/sci/physics/elmer/doc/ ElmerSolverManual.pdf). Все границы параллелепипеда модели, кроме верхней, были закреплены как неподвижные. Предел сходимости итераций был установлен 10⁻⁵, что позволяет оценить ошибку в значении полученных деформаций менее 1 см. Количество итераций расчета для каждого временного шага начиналось от 2500 и в процессе вычисления падало до 140. Время счета на машине AMD Ryzen7 2700 eightcore processor ×16 Memory 32GB заняло 48 ч.

Результаты и обсуждение

Целью 3D-моделирования являлась оценка вертикальных деформаций при нагружении земных недр в модели, построенной с учетом конфигурации реальной поверхности границы Мохо. Нагружение морского дна происходило линейно возрастающей нагрузкой, симулирующей увеличивающуюся в результате поступления талой воды из покровных ледников в межледниковые периоды толщу воды. Астеносферный слой не учитывался. На рис. 3 показано пространственное распределение деформаций, полученных после нагружения дна моря увеличивающейся по линейному закону



Рис. 3. Распределение положительных и отрицательных деформаций после нагружения 120-метровым слоем воды поверхности дна Охотского моря.

Fig. 3. Positive and negative deformation distribution after loading the Sea of Okhotsk bottom with 120 meters of water layer.

толщей воды в течение 17 000 лет до глубины 120 м. На рис. 4 показаны разрезы по профилям, указанным на рис. 3.

На фоне положительных деформаций (растяжения) участков суши и отрицательных (сжатия) для морского дна выделяются наи-



большие по амплитуде отрицательные деформации: Центрально-Охотского поднятия и района шельфа северной части Охотского моря, зал. Шелихова и впадины Тинро, центральных частей Японского моря и Курильской (Южно-Охотской) впадины – и наибольшие по амплитуде положительные деформации: прол. Невельского, северо-запада Сахалина, части Приамурья, центральной части Камчатки и района севернее г. Магадан (рис. 1 b). Любопытно, что положительные деформации района прол. Невельского были также получены ранее в работе, посвященной связи гидроизостазии с четвертичными вертикальными движениями о. Сахалин [Булгаков, Сеначин, 2019].

Предварительно выявилась следующая особенность распределения деформаций по поверхности, судя по разрезам, приведенным на рис. 4: амплитуды деформаций, оказалось, коррелируют не только с мощностью литосферы, но и с размером площади без значительных и резких изменений глубины.



Рис. 4. Поперечные профили (расположение их указано на рис. 3). **Fig. 4.** Cross-sections (see for location in Fig. 3).

В отношении распределения во времени и пространстве максимальных отрицательных (рис. 5 а) и максимальных положительных (рис. 5 b) деформаций оказалось, что в начале нагружения максимум отрицательных деформаций смещался с северо-охотского шельфа в зал. Шелихова и обратно, а положительных – с прол. Невельского на Центральную Камчатку, но через несколько тысяч лет максимум и минимум деформаций перестают менять свое положение.

Обращают на себя внимание следующие особенности распределения положительных и отрицательных деформаций вдоль береговой зоны (рис. 3). Побережье Приморья испытывает погружение. Любопытно, что перед этим аналогичные результаты были получены нами ранее в работе, посвященной связи вертикальных тектонических движений Приморья с гидроизостазией [Булгаков и др., 2020]. Побережье устья р. Амур в районе расположения Шантарских островов испытывает положительные деформации. Хотя далее на северо-восток вдоль побережья до зал. Шелихова в пределах береговой линии преобладают нисходящие движения.

В распределении положительных и отрицательных деформаций во времени интерес-

50

60

тыс. лет (kv)

90

80

70

о<mark>м (m)</mark>

10

20

30

40

ны следующие особенности. Отрицательные максимальные деформации не успели полностью релаксировать к состоянию до нагружения даже после 60 000 лет без нагрузки водной толщи, что соизмеримо с длительностью ледниковых периодов. Положительные максимальные деформации при релаксировании смещаются с Центральной Камчатки на прол. Невельского и обратно, тогда как отрицательные мигрируют между зал. Шелихова и североохотским шельфом.

Заключение

3D-моделирование методом конечных элементов (МКЭ) с учетом реальной поверхности границы Мохо при нагружении водной толщей, сопоставимой с водной толщей, высвобождаемой в межледниковья плейстоцена, показало сложную зависимость деформаций от конфигурации поверхности Мохо. Релаксация во времени упругой литосферы и вязкоупругой мантии после полного снятия нагрузки оказалась продолжительной и соизмеримой по длительности, например, с последним ледниковым периодом. Это позволяет допустить, что в ледниковые периоды остаточные гидроизостатические деформации морского дна и прилегающей суши продолжались.

Программный пакет Elmer показал свою пригодность для решения геофизических задач.



Рис. 5. Изменение максимальных отрицательных деформаций (дно Охотского моря) (а) и максимально положительных деформаций (окружающая суша) (b) во времени – нагружение увеличивающейся по линейному закону толщей водного слоя от 0 до 120 м в течение 17 000 лет и последующая релаксация после мгновенного полного снятия нагрузки водной толщи в продолжение 61 000 лет.

Fig. 5. (a) Variation of maximal negative deformations (the Sea of Okhotsk bottom) and (b) variation of maximal positive deformation (surround land) in time under loading with a linearly increasing water layer from 0 to 120 meters during 17 ky and following relaxation after instantaneous complete removing of water load during 61 ky.

Список литературы

1. Булгаков Р.Ф. **2021.** Опыт численного моделирования гидроизостазии методом конечных элементов. *Геоинформатика*, 2: 26–32. doi:10.47148/1609-364X-2021-2-26-32

2. Булгаков Р.Ф., Сеначин В.Н. **2019.** Морские террасы и влияние эффекта гидроизостазии на вертикальные движения Сахалина. *Геосистемы переходных зон*, 3(3): 277–286. doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286

3. Булгаков Р.Ф., Афанасьев В.В., Игнатов Е.И. **2020.** Гидроизостазия как фактор, повлиявший на ход послеледниковой трансгрессии на шельфе и побережье Приморья, по результатам численного моделирования. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 210–219. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.210-219.220-229

4. Сеначин В.Н., Веселов О.В., Семакин В.П., Кочергин Е.В. **2013.** Цифровая модель земной коры Охотоморского региона. *Геоинформатика*, 4: 33–44.

5. Bartholet A., Milne G.A., Latychev K. **2021.** Modelling sea-level fingerprints of glaciated regions with low mantle viscosity. *Earth System Dynamics*, 12: 783–795. https://doi.org/10.5194/esd-12-783-2021

6. Clark J.A., Lingle C.S. **1979.** Predicted relative sea-level changes (18,000 years b.p. to Present) caused by late-glacial retreat of the Antarctic ice sheet. *Quaternary Research*, 11(3): 279–298. https://doi.org/10.1016/0033-5894(79)90076-0

7. Farrel W.E., Clark J.A. **1976.** On postglacial sea level. *Geophysical J. of the Royal Astronomical Society*, 46(3): 647–667. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1976.tb01252.x

8. Peltier W.R. **1974.** The impulse response of Maxwell Earth. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 12(4): 649–669. https://doi.org/10.1029/rg012i004p00649

9. Steffen H., Kaufmann G., Wu P. **2006.** Three-dimensional finite-element modeling of the glacial isostatic adjusment in Fennoscandia. *Earth and Planetary Science Letters*, 250(1–2): 358–375. doi:10.1016/j.epsl.2006.08.003

References

1. Bulgakov R.F. **2021.** Digital simulation trial of hydroisostasy by finite element method. *Geoinformatika*, 2: 26–32. (In Russ.). doi:10.47148/1609-364X-2021-2-26-32

2. Bulgakov R.F., Senachin V.N. **2019.** Marine terraces and hydroisostasy influence on the vertical movements of the Sakhalin. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 3(3): 277–286. (In Russ.). doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286

3. Bulgakov R.F., Afanas' ev V.V., Ignatov E.I. **2020.** Effect of hydroisostasy on postglacial transgression on the shelf and coast of Primorye as revealed by computer modelling. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 4(2): 210–219. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.210-219.220-229

4. Senachin V.N., Veselov O.V., Semakin V.P., Kochergin E.V. **2013.** Digital model of the earth's crust of the Okhotsk Sea region. *Geoinformatika*, 4: 33–44. (In Russ.).

5. Bartholet A., Milne G.A., Latychev K. **2021.** Modelling sea-level fingerprints of glaciated regions with low mantle viscosity. *Earth System Dynamics*, 12: 783–795. https://doi.org/10.5194/esd-12-783-2021

6. Clark J.A., Lingle C.S. **1979.** Predicted relative sea-level changes (18,000 years b.p. to Present) caused by late-glacial retreat of the Antarctic ice sheet. *Quaternary Research*, 11(3): 279–298. https://doi.org/10.1016/0033-5894(79)90076-0

7. Farrel W.E., Clark J.A. **1976.** On postglacial sea level. *Geophysical J. of the Royal Astronomical Society*, 46(3): 647–667. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1976.tb01252.x

8. Peltier W.R. **1974.** The impulse response of Maxwell Earth. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 12(4): 649–669. https://doi.org/10.1029/rg012i004p00649

9. Steffen H., Kaufmann G., Wu P. **2006.** Three-dimensional finite-element modeling of the glacial isostatic adjusment in Fennoscandia. *Earth and Planetary Science Letters*, 250(1–2): 358–375. doi:10.1016/j.epsl.2006.08.003

Об авторе

БУЛГАКОВ Рустям Фаридович (https://orcid.org/0000-0001-9095-3785), кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории береговых геосистем, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, r.bulgakov@imgg.ru

About the Author

BULGAKOV Rustyam F. (https://orcid.org/0000-0001-9095-3785), Cand. of Sci. (Geography), Senior Researcher of Laboratory of coastal geosystems, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, r.bulgakov@imgg.ru Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 004:551.3

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.346-353

Состояние информационно-аналитической базы данных экзогенных геологических процессов на территории Уральского федерального округа

© 2021 С. Н. Елохина, Т. С. Мызникова*, А. А. Худяков

«Гидроспецгеология», филиал «Уральский региональный центр государственного мониторинга состояния недр», Екатеринбург, Россия *E-mail: myznikova@gmsn-ural.ru

Резюме. На территории Уральского федерального округа (УФО) развиты 13 генетических типов опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП). Целью работы является иллюстрация системы учета и накопления информации по проявлениям опасных ЭГП каждого типа. При ведении государственного мониторинга состояния недр (ГМСН) накопление информации о проявлениях ЭГП осуществляется в структурированных массивах данных (СМД), организованных для каждого субъекта РФ в пределах УФО. Источниками информации служат результаты площадных регулярных и разовых инженерно-геологических обследований, материалы официальных открытых и фондовых источников. На основе накопленных данных сделан вывод, что из опасных ЭГП на территории УФО наиболее распространены овражная эрозия (28.4 %) и карстово-суффозионный процесс (21.5 %), составляющие суммарно около половины от общего количества всех учтенных проявлений. Эксплуатация информационно-аналитической базы ГМСН ЭГП позволяет выполнять учетные, аналитические (в том числе по выявлению закономерностей развития ЭГП за выбранный интервал времени), отчетно-статистические функции, повышает достоверность сезонных и годовых прогнозов.

Ключевые слова: структурированный массив данных, опасные экзогенные геологические процессы, мониторинг состояния недр, Уральский федеральный округ

State of the information and analytic database of exogenous geological processes on the territory of the Ural Federal District

Svetlana N. Elokhina, Tatiana S. Myznikova*, Alexander A. Khudyakov

"Hydrospetsgeology", Branch of the Ural Regional Center of the State Mining Inspectorate, Ekaterinburg, Russia *E-mail: myznikova@gmsn-ural.ru

Abstract. 13 genetic types of dangerous exogenous geological processes (EGP) have been developed on the territory of the Ural Federal District (UFD). This work aims to illustrate the system of accounting and accumulating information on the manifestations of dangerous EGPs of each genetic type. When conducting the state monitoring of the subsurface state (SMSS), the information about the EGP manifestations is accumulated in the structured data arrays (SDAs), which are organized for each subject of the Russian Federation within the UFD. The sources of information are the results of areal regular and one-time engineering and geological surveys, materials from official open and stock sources. On the basis of accumulated data, we have concluded that the most common genetic types of dangerous EGPs in the UFD territory are gully erosion (28.4 %) and karst-suffusion process (21.5 %), which make up about half of the total number of all recorded manifestations. The operation of the information and analytical base of the SMSS EGP allows to perform accounting, analytical (including the identification of patterns of EGP development for a selected time interval), reporting and statistical functions, increases the reliability of seasonal and annual forecasts.

Keywords: structured data array, dangerous exogenous geological processes, monitoring of the subsurface state, Ural Federal District

Для цитирования: Елохина С.Н., Мызникова Т.С., Худяков А.А. Состояние информационно-аналитической базы данных экзогенных геологических процессов на территории Уральского федерального округа. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 4, с. 346–353. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.346-353

Введение

В литературе последних десятилетий отмечается активность в создании и анализе баз данных для различных геологических и геофизических работ. В статье В.В. Бродягина [2000] подчеркивается значимость ведения баз данных на каждом этапе изучения геологического строения месторождений. Создание и использование баз данных позволяет сократить время на обработку данных и уменьшить число ошибок, призвано обеспечить специалистов актуальной верифицированной информацией [Гизатуллин, Анищик, 2017].

Экзогенные геологические процессы (ЭГП) – это геологические процессы, обусловленные внешними по отношению к Земле источниками энергии в сочетании с силами гравитации. Распространение и развитие ЭГП на территории Уральского федерального округа (УФО) определяются факторами природного и природно-техногенного характера. В работе [Грязнов, 2017] описаны опасные ЭГП природно-техногенного характера, наиболее широко развитые на территории УФО. Они отличаются масштабностью и интенсивностью. Масштабы проявлений ЭГП природного характера на территории УФО определяются преимущественно климатическими факторами.

УФО включает 4 административные области (Курганскую, Свердловскую, Тюменскую и Челябинскую) и два автономных округа: Ханты-Мансийский (ХМАО-Югра) и Ямало-Ненецкий (ЯНАО). Округ расположен в пределах 4 инженерно-геологических регионов: Предуральского, Пайхой-Новоземельского, Уральского и Западно-Сибирского [Инженерная..., 1978]. В Предуралье (западные части Свердловской и Челябинской областей) преобладают карстово-суффозионные процессы, оползне- и оврагообразование. Для Пайхой-Новоземельского региона характерны преимущественно криогенные процессы (криогенное пучение, термокарст, солифлюкция и др.). В Уральском регионе (горная часть Свердловской, Челябинской областей, ХМАО-Югра и ЯНАО) в условиях перепада высот от 300 до 1700 м развивается гравитационный комплекс процессов - оползни, обвалы, осыпи. В области криолитозоны (ХМАО-Югра и ЯНАО) к ним добавляются криогенные процессы: со*For citation:* Elokhina S.N., Myznikova T.S., Khudyakov A.A. State of the information and analytic database of exogenous geological processes on the territory of the Ural Federal District. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 346–353. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.346-353

лифлюкция, пучение, физическое (температурное) выветривание, а также обвалы, осыпи, эрозионные и эоловые процессы. На территории Уральского региона активно, хотя и неравномерно, развит карстово-суффозионный процесс. В Западно-Сибирском наиболее яркими примерами являются овражная эрозия, гравитационные процессы, суффозия.

Наблюдательная сеть мониторинга опасных ЭГП на территории Уральского федерального округа

На территории субъектов РФ с целью оценки состояния геологической среды и прогноза ее изменений под влиянием природных и техногенных факторов осуществляется государственный мониторинг состояния недр (ГМСН), который представляет собой систему регулярных (ежегодных) наблюдений, сбора, накопления, обработки, анализа и обобщения информации с целью оценки состояния геологической среды и прогноза ее изменений под влиянием природных и техногенных факторов. ГМСН является частью государственного экологического мониторинга окружающей среды и функциональной подсистемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (МЧС России). Работы по объекту «Государственный мониторинг состояния недр по территории Уральского федерального округа», включая опасные ЭГП, выполняются с 2008 г. [Информационный..., 2020].

В 2020–2021 гг. для ежегодной оценки современного состояния и прогноза активности ЭГП наблюдения на регулярной основе выполнялись на 33 пунктах опорной наблюдательной сети (табл. 1). Сеть охватывает все инженерно-геологические регионы, кроме неосвоенного Пайхой-Новоземельского. Пункты расположены на участках с различной техногенной нагрузкой, что позволяет изучать активность процессов как в природных условиях, так и в условиях, осложненных хозяйственной деятельностью.

Дополнительным источником информации служат результаты площадных плановых (разовых, периодических) инженерно-геологических обследований, материалы официальных, открытых и фондовых источников, сообщения муниципальных образований регионов. В экстренных случаях на участки резкой активизаТаблица 1. Распределение пунктов наблюдательной сети ГМСН и типов опасных ЭГП по территории субъектов РФ Уральского федерального округа в 2020 г.

Table 1. Distribution of points of the SMSS observation network and types of dangerous EGPs on the territory of the subjects of the Russian Federation of the Ural Federal District in 2020

	Количество пунктов наблюдения	Наблюдаемые опасные ЭГП					
Суоъект РФ		Оп	Эо	КС	Су	ГР	Пт
Курганская область	6	2	4	_	1	_	_
Свердловская область	8	3	_	5	_	_	_
Тюменская область	4	1	3	_	3	1	_
Челябинская область	7	4	1	1	_	_	1
ХМАО-Югра	4	1	1	_	1	3	_
ЯНАО	4	_	2	_	1	_	1
Всего на территории УФО	33	11	11	6	6	4	2

Примечания. Оп – оползневый процесс, Эо – овражная эрозия, КС – карстово-суффозионные процессы, Су – суффозионные процессы, ГР – гравитационные процессы, Пт – подтопление. На одном пункте наблюдения могут вестись за несколькими типами опасных ЭГП (Тюменская область, ХМАО-Югра). Прочерк – отсутствие значимых проявлений.

Notes. $O\Pi$ – a landslide process, $\Im o$ – gully erosion, KC – karst-suffosion processes, Cy – suffusion processes, ΓP – gravitational processes, ΠT – flooding. At one point, the observations can be carried out for several types of dangerous EGP (Tyumen Region, the Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra). Dash – absence of significant manifestations.

ции опасных ЭГП осуществляются оперативные выезды. В настоящее время 13 участков из 48 (33 участка регулярных наблюдений и 15 плановых, разовых) подвержены нескольким типам ЭГП.

Наблюдения за опасными ЭГП включают, помимо маршрутного обследования территорий и расположенных на них инженерных объектов, их привязку с помощью GPS-навигатора, фотодокументацию, описание формы проявлений в плане и разрезе, линейные замеры с использованием ранее установленных и новых грунтовых марок, реперов. Фиксируются признаки активизации процессов: следы свежих срывов, трещин растяжения, изменение их направления, величина вертикального смещения и др.

С 2019 г. для фотосъемки участков развития опасных ЭГП применяются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) фирмы DJI: Phantom 4 Pro и Mavic Mini. За два года БПЛА использовались при выполнении инженерногеологических обследований на 20 участках. Снимки обрабатываются в программах Agisoft Metashape, ArcGis 10.2. Применение БПЛА позволяет провести детальную оценку масштаба проявления процесса, выделить его линеаменты и контуры (рис. 1).



Рис. 1. Строение активного техногенного оползня по автодороге на горнолыжный комплекс «Аджигардак», Ашинский участок Челябинской области (снимок БПЛА). Фото здесь и далее А.А. Худякова

Fig. 1. The structure of an active man-made landslide along the highway to the "Adzhigardak" ski resort, Ashinsky site of the Chelyabinsk Region (UAV image). *Hereinafter, photos by A.A. Khudyakov*

Опасные экзогенные геологические процессы на территории УФО

Гравитационные процессы (оползни, обвалы, осыпи) наблюдаются на территории всех субъектов УФО. Техногенные оползни, обвально-осыпные процессы широко развиты на территории Свердловской области (Еловский и Липовский никелевый карьеры). В Челябинской области ярким примером является Копейский отработанный угольный разрез, сложенный неустойчивыми к выветриванию терригенными отложениями, в процессе его «мокрой» ликвидации. Как показали результаты ГМСН 2020 г., региональная активность гравитационного комплекса процессов изменялась в широких пределах: от очень высокой (Западно-Сибирский регион) до низкой (Уральский регион).

Ярким примером очень высокой активности служит Верхне-Иленский участок Свердловской области, на котором в 2020 г. активизировался оползневый процесс в бассейне р. Ница (рис. 2). Для определения скорости оползневого процесса пункты наблюдений на крупных проявлениях процесса в Свердловской, Курганской и Челябинской областях в 2018–2019 гг. оборудованы реперной сетью с обеспечением ежегодной планово-высотной привязки с точностью 0.003–0.02 м.

Наблюдения за процессом *овражной эро*зии в границах УФО в 2020 г. проведены на 20 участках, 18 из которых расположены в Западно-Сибирском инженерно-геологическом регионе (рис. 3). Региональная активность овражной эрозии варьирует от низкого и среднего уровня на площади горноскладчатого Урала до высокого – на территории Западной Сибири, что вполне коррелирует с метеорологическими данными.

Карстово-суффозионные процессы на территории УФО распространены крайне неравномерно и приурочены к районам развития карбонатных и сульфатных пород. Свердловская и Челябинская области расположены в пределах Предуральской, Западно-Уральской, Центрально-Уральской, Тагило-Магнитогорской, Северо-Уральской и Восточно-Уральской карстовых провинций. Активность карстово-суффозионного комплекса с запада на восток варьировала от среднего уровня в Предуральской карстовой провинции (рис. 4) до высокого в Западно-Уральской (Нижнесер-



Рис. 2. Активизация оползневого процесса на Верхне-Иленском участке в Свердловской обл. Вид на бровку отрыва 26.10.2020 (слева) и 08.06.2021.

Fig. 2. Activation of the landslide process at the Verkhne-Ilensky site in the Sverdlovsk Region. View of the edge of the separation, left -26.10.2020, right -08.06.2021.



Рис. 3. Проявление овражной эрозии на Орловском участке в Курганской области (Западно-Сибирский регион). **Fig. 3.** The manifestation of gully erosion at the Orlovsky site in the Kurgan Region (West Siberian Region).



Рис. 4. Южная активная часть карстовой котловины на территории Красноуфимского участка Свердловской области (снимок БПЛА).

Fig. 4. The southern active part of the karst basin on the territory of the Krasnoufimsky site of the Sverdlovsk Region (UAV image).

гинский участок). А далее на восток снижалась до среднего уровня в Тагило-Магнитогорской и Восточно-Уральской карстовых провинциях (Янгельский и Каменский участки).

Учитывая историю развития Урала, в настоящее время серьезную угрозу безопасности населения и хозяйственной деятельности человека представляет *оседание и обрушение земной поверхности над подземными горными выработками*. В Свердловской области это Северо-Уральские бокситовые рудники, шахты Тагило-Кушвинской группы месторождений, Крылатовское золоторудное, Левихинское и Дегтярское отработанные медноколчеданные месторождения и некоторые другие геологические объекты. На территории Челябинской области это практически полностью отработанные угольные месторождения в районе городов Челябинск-Копейск-Коркино.

Структурированный массив данных ГМСН ЭГП

В системе государственного мониторинга получаемые сведения организованы в ведомственные региональные информационно-аналитические базы данных, представленные в виде специализированных структурированных массивов данных (СМД) в подсистеме «опасные ЭГП».

СМД ГМСН ЭГП содержит информацию о проявлениях опасных экзогенных геологических процессов (паспорта проявлений), технологических объектах мониторинга (паспорта технологических объектов), случаях воздействий ЭГП на населенные пункты, линейные сооружения и земли различного назначения (учетные карточки воздействий), а также данные режимных наблюдений на технологических объектах мониторинга (рис. 5). Все точки обеспечены координатной привязкой с точностью до 1 м и совмещены с картографическим материалом, в подсистеме предусмотрен блок, позволяющий



Рис. 5. Разделы структурированного массива данных ГМСН ЭГП. **Fig. 5.** Sections of the structured data array of the SMSS EGP.

осуществлять работу с электронной картой. Ведется работа над повышением точности координатной привязки геодинамических данных путем использования профессионального геодезического оборудования.

Работа с программой осуществляется с помощью экранных форм обработки данных. Элементами управления могут выступать наборы кнопок на панели инструментов, строки меню, пиктограммы, древовидные списки, переключатели.

Модуль «Поиск» предназначен для формирования сложных запросов при поиске информации в системе с возможностью создания произвольных выборок и отчетов из базы данных. Предусмотрено создание следующих отчетов: каталог проявлений ЭГП; справка о проявлении ЭГП; справка о технологическом объекте; сводные данные о воздействии ЭГП на населенные пункты и др. Вывод отчетов производится в виде таблиц Excel.

В блоках «Паспорта проявлений», «Технологические объекты» и «Воздействия ЭГП» предусмотрена форма «Документы», где находятся текстовые файлы в формате Microsoft Word, Excel. Форма «Изображения» предназначена для хранения фотографий, что способствует наглядности представления результатов. Форма «Геология» содержит послойную стратиграфо-генетическую и литологическую характеристики типового геологического разреза на территории, включающей как площадь проявления ЭГП, так и сопредельные с ней. В форму в виде таблицы включен геологический разрез начиная от земной поверхности.

В системе предусмотрено создание паспортов 6 видов проявлений (см. рис. 5). Для обвалов, осыпей, суффозионного, термокарстового процессов, процессов подтопления, оседания и обрушения поверхности над горными выработками, солифлюкции, дефляции СМД ГМСН «опасные ЭГП» ведутся и пополняются по форме 1.4.1 в формате Excel (см. табл. 2).

С 2011 по 2020 г. в базе данных ГМСН ЭГП по УФО создано более тысячи паспортов проявлений, в том числе около 50 по Курганской, 300 – Свердловской, 450 – Тюменской, 150 – Челябинской областям, 40 – по Ханты– Мансийскому автономному округу – Югра и около 150 – по территории Ямало-Ненецкого автономного округа. В целом по УФО содержатся данные о 1480 проявлениях опасных ЭГП (табл. 2).

Блок СМД ГМСН ЭГП «Технологические объекты» по субъектам УФО содержит материалы о регулярной наблюдательной сети, которые ежегодно вносятся во вкладку «Данные наблюдений», также есть вкладки по фотоматериалам, документации и количественной оценке динамики процесса. С технологическими объектами связаны паспорта проявлений. В настоящее время в блоке находится 92 объекта.

Блок СМД ГМСН ЭГП «Воздействия ЭГП» содержит 166 объектов. Учет воздействий ЭГП ведется по трем типам объектов: населенный пункт (64.5 %), линейное сооружение (30.1 %), земли (5.4 %). Основное количество объектов (47 %) находится в базе Тюменской области.

Начальный этап формирования массива данных проходил с 2011 по 2014 г., далее СМД ГМСН ЭГП пополнялся (рис. 6). Максимальные объемы информации сформированы по Тюменской и Свердловской областям.

На диаграмме (рис. 7) представлены различные генетические типы процессов, внесенных в СМД ГМСН ЭГП по УФО. Наибольшую долю занимают овражная эрозия (28 %), проявления карстово-суффозионного (22 %) и оползневого (16 %) процессов.

0								
	Количество							
Субъект РФ	Паспорта проявлений	Форма 1.4.1	Всего проявлений	Технологические объекты	Воздействия ЭГП			
Курганская область	49	108	157	15	11			
Свердловская область	300	106	406	44	15			
Тюменская область	473	16	489	6	76			
Челябинская область	150	15	165	15	13			
ХМАО–Югра	40	41	81	4	25			
ЯНАО	147	35	182	8	26			
Итого по УФО	1159	321	1480	92	166			

Таблица 2. Наполнение разделов СМД ГМСН ЭГП по субъектам УФО по состоянию на 01.01.2021 г. *Table 2.* Filling in the sections of the SDA of the SMSS EGP for the subjects of the Ural Federal District as of 01.01.2021



Рис. 6. Динамика накопления информации в СМД ГМСН ЭГП по УФО.

Fig. 6. Dynamics of information accumulation in the structured data arrow of SMSS EGP for the UFD.

Пополнение массива данных происходит в основном благодаря плановым инженерногеологическим обследованиям, охватывающим основные типы опасных ЭГП, которые определяются по выявленным участкам активизации ЭГП, по данным дешифрирования космоснимков, со спутников «Sentinel» и «Maxar Technologies», по ответам из муниципалитетов.

Эксплуатация СМД ГМСН ЭГП позволяет сократить сроки выполнения таких операций, как учет проявлений геологических процессов, подготовку регламентных и отчетных документов, таблиц для построения актуализированных дежурных карт, и унифицировать структуру, содержание, форматы и формы хранения, накопления и представления данных при ведении ГМСН. Ведение СМД ГМСН ЭГП по территориям шести субъектов Российской Федерации включает ежеквартальную подготовку актуализированных баз данных.



Рис. 7. Генетические типы опасных ЭГП на территории Уральского федерального округа в СМД ГМСН ЭГП по состоянию на 01.01.2021 г. (в %).

Fig. 7. Genetic types of dangerous EGPs on the territory of the Ural Federal District in the SDA of the SMSS EGP as of 01.01.2021 (in %).

Заключение

В составе государственного мониторинга состояния недр изучение опасных экзогенных геологических процессов представляет собой систему регулярных наблюдений, обработки, анализа информации для оценки состояния среды и прогноза ее изменений. Информационно-аналитическая база данных ГМСН экзогенных геологических процессов содержит сведения о распространении и развитии проявлений ЭГП на территории Уральского федерального округа. За 11 лет в ней накоплено более 1100 паспортов проявлений различных генетических типов опасных ЭГП в разнообразных природных и природно-техногенных **условиях**. Эксплуатация информационноаналитической базы данных ГМСН ЭГП позволяет выполнять учетные, аналитические, отчетно-статистические функции, сократить время подготовки регламентных и отчетных документов, таблиц для построения карт пораженности территорий и активизации процессов ЭГП. В целом наращивание информационной базы в перспективе важно для повышения достоверности сезонных и годовых прогнозов развития опасных экзогенных геологических процессов в регионе.

С 2020 г. актуальная информация по активным геологическим процессам отражается на ведомственной интерактивной карте, работающей в on-line режиме на электронном ресурсе учреждения (http://geomonitoring. ru:13159). Информационная продукция мониторинга опасных ЭГП (сводки, прогнозы), созданная с помощью СМД ГМСН ЭГП, рассылается в Роснедра, Главные управления МЧС России по субъектам РФ, Росводресурсы, Росгидромет, Департамент по недропользованию по УФО, правительства субъектов Российской Федерации.

Ведение СМД ГМСН ЭГП необходимо продолжать и развивать, используя новые современные способы получения информации (фотометрия и технологии LIDAR с применением БПЛА; использование приборов Logger LPC-ZB-T-S для измерения горизонтальных смещений тела оползня, и т.д.), добиваясь точности координатной привязки объектов наблюдения.

Список литературы

1. Бродягин В.В. **2000.** Создание и сопровождение баз данных в геологии. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*, 3: 35–41.

2. Гизатуллин Р.З., Анищик В.В. **2017.** Базы данных как основа работы геологического направления. *PROHEФТЬ. Профессионально о нефти*, 3(5): 76–79.

3. Грязнов О.Н. 2017. Инженерно-геологические условия Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 240 с.

4. Инженерная геология СССР: в 8 т. 1978. Т. 5. Алтай, Урал. М.: Изд-во Москов. ун-та, 219 с.

5. Информационный бюллетень о состоянии недр Уральского федерального округа Российской Федерации за 2019 год (ред. С.Н. Елохина). 2020. Вып. № 20. Екатеринбург: Гидроспецгеология, 321 с.

References

1. Brodyagin V.V. **2000.** [Creation and maintenance of databases in geology]. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil and gas and mining*, 3: 35–41.

2. Gizatullin R.Z., Anishchik V.V. **2017.** [Databases as the basis of the work of the geological direction]. *PRONEFT. Professionally about oil*, 3(5): 76–79.

3. Gryaznov O.N. **2017.** *Inzhenerno-geologicheskie usloviya Urala* [Engineering and geological conditions of Ural]. Ekaterinburg: Izd-vo UGGU, 240 p.

4. Inzhenernaya geologiya SSSR [Engineering geology of the USSR]. 1978. Vol. 5. Altay, Ural. Moscow: Izd-vo Moscow Univers., 219 p.

5. Informatsionnyy byulleten' o sostoyanii nedr Ural'skogo federal'nogo okruga Rossiyskoy Federatsii za 2019 god [Informational bulletin on the subsurface state of the Ural Federal District of the Russian Federation for 2019] (ed. S.N. Elokhina). 2020. Iss. 20. Ekaterinburg: Gidrospetsgeologiya, 321 p.

Об авторах

ЕЛОХИНА Светлана Николаевна (https://orcid.org/0000-0002-8641-5439), доктор геолого-минералогических наук, директор филиала «Уральский региональный центр ГМСН» ФГБУ «Гидроспецгеология», Екатеринбург, elohina@gmsn.ru

МЫЗНИКОВА Татьяна Станиславовна (https://orcid. org/0000-0002-2386-9695), специалист I категории, региональный отдел мониторинга и прогноза состояния подземных вод и опасных геологических процессов, Уральский региональный центр ГМСН, Екатеринбург, myznikova@gmsn.ru

ХУДЯКОВ Александр Анатольевич (https://orcid. org/0000-0002-3129-9872), специалист I категории, региональный отдел мониторинга и прогноза состояния подземных вод и опасных геологических процессов, Уральский региональный центр ГМСН, Екатеринбург, hudyakov@gmsn.ru ELOKHINA Svetlana N. (https://orcid.org/0000-0002-8641-5439), Doctor of Geology and Mineralogy, Director of the branch "Ural Regional Center of State Mining Inspectorate" of the Federal State Budgetary Institution "Hydrospetsgeology", Ekaterinburg, elohina@gmsn.ru

MYZNIKOVA Tatyana S. (https://orcid.org/0000-0002-2386-9695), Specialist of the I category, Regional department for monitoring and forecasting the state of groundwater and hazardous geological processes, Ural Regional Center of the State Mining Inspectorate, Ekaterinburg, myznikova@gmsn.ru

KHUDYAKOV Alexander A. (https://orcid.org/0000-0002-3129-9872), Specialist of the I category, Regional department for monitoring and forecasting the state of groundwater and hazardous geological processes, Ural Regional Center of the State Mining Inspectorate, Ekaterinburg, hudyakov@gmsn.ru

About the Authors

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.354-360

Активность вулканов Чиринкотан и Пик Сарычева в 2021 г. (Курильские острова)

© 2021 А. В. Дегтерев*, М. В. Чибисова, Р. В. Жарков

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: d a88@mail.ru

Резюме. В сообщении, основанном на спутниковых данных и результатах визуальных наблюдений, рассмотрены основные особенности активности вулканов Чиринкотан (о. Чиринкотан, Северные Курилы) и Пик Сарычева (о. Матуа, Северные Курилы) в 2021 г. В период с 8 по 23 августа 2021 г. происходило умеренное эксплозивное извержение вулкана Чиринкотан. За это время зарегистрировано 11 вулканических взрывов на высоту от 1.5 до 4.5 км н.у.м. По своим параметрам оно было схоже с его предыдущими извержениями в 2013–2015, 2016, 2017 гг. На вулкане Пик Сарычева 29 июня, 1 июля, 6 августа и 26 ноября 2021 г. зафиксированы единичные, относительно слабые выбросы на высоту около 2.2–3 км н.у.м. Текущая активность вулкана сопряжена с недавним эффузивным извержением, происходившим с декабря 2020 по февраль 2021 г., в результате которого кратер и жерло вулкана оказались запечатаны лавой.

Ключевые слова: вулкан, извержение, Курильские острова, Чиринкотан, Пик Сарычева

Activity of Chirinkotan and Sarychev Peak volcanoes in 2021 (Kuril Islands)

Artem V. Degterev*, Marina V. Chibisova, Rafael' V. Zharkov

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: d a88@mail.ru

Abstract. This communication, based on satellite data and the results of visual observations, considers the main features of the activity of Chirinkotan and Sarychev Peak volcanoes in 2021. In the period from August 8 to 23, 2021, a moderate explosive eruption of Chirinkotan volcano took place. During this time, 11 volcanic explosions were recorded at an altitude of 1.5 to 4.5 km a.s.l. The parameters of the 2021 eruption were similar to previous eruptions in 2013–2015, 2016, 2017. At Sarychev Peak volcano on June 29, July 1, August 6 and November 26 of 2021 single relatively weak ejections to an altitude of about 2.2–3 km a.s.l. were recorded. Current activity of the volcano is associated with a recent effusive eruption that has taken place from December 2020 to February 2021, in which result a crater and mouth of the volcano turned out to be sealed with lava.

Keywords: volcano, eruption, Kuril Islands, Chirinkotan, Sarychev Peak

Для цитирования: Дегтерев А.В., Чибисова М.В., Жарков Р.В. Активность вулканов Чиринкотан и Пик Сарычева в 2021 г. (Курильские острова). Геосистемы переходных зон, 2021, т. 5, № 4, с. 354–360. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.354-360

Благодарности и финансирование

Работа выполнена в соответствии с планом НИР Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (регистр. номер НИОКР ГР 121030100168-3; дата регистр. в Центре информационных технологий и систем органов исполнительной власти 24.02.2021; рук. А.В. Рыбин) при поддержке гранта Президента РФ «Современные газогеохимические особенности *For citation:* Degterev A.V., Chibisova M.V., Zharkov R.V. Activity of Chirinkotan and Sarychev Peak volcanoes in 2021 (Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 354–360. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.354-360

Acknowledgements and Funding

The work was carried out in accordance with the plan of the research work of the Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS (registration number NIOKR GR 121030100168-3; date of registration in "The Center for Information Technologies and Systems of Executive Authorities" 24.02.2021. Head – A.V. Rybin) with the support of the grant of the President of the

УДК 551.21

газогидротермальных систем, грязевых вулканов, термальных и минеральных источников острова Сахалин, их связь с сейсмичностью и формированием газоопасных зон заселенных территорий», 2021– 2022 гг. (рук. Н.С. Сырбу, Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН им. В.И. Ильичева). Авторы признательны организаторам и участникам российско-белорусской экспедиции, выполнявшейся в рамках составной части НИР «Интеграция-СГ-3.2.5.1», а также экипажу судна «Курилгео» за неоценимую помощь при проведении полевых работ на Курильских островах.

Введение

В последние годы вулканы Чиринкотан (о. Чиринкотан, Северные Курилы) и Пик Сарычева (о. Матуа, Центральные Курилы) являются особенно активными: в текущем столетии это практически единственные «регулярно» работающие вулканы (Рыбин и др., 2017б) центральной части Курильской островной дуги (рис. 1). Несмотря на то что расположены они вдали от населенных пунктов (от ближайшего к ним г. Северо-Курильск до влк. Пик Сарычева 270 км, до влк. Чиринкотан – 350 км), их извержения представляют потенциальную опасность для региональных и международных авиалиний. В этой связи любые новые данные, характеризующие особенности эруптивной деятельности этих вулканов, представляют большой интерес.



Рис. 1. Географическое положение островов Чиринкотан и Матуа в системе Курильской островной дуги. **Fig.1.** The geographical location of the Chirinkotan Isl. and Matua Isl. in the system of the Kuril Island arc.

Russian Federation "Modern gas-geochemical features of gas-hydrothermal systems, mud volcanoes, thermal and mineral springs of Sakhalin Island, their relation to seismicity and the formation of gas hazardous zones of populated areas", 2021-2022 (Head - N.S. Syrbu, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS). The authors are grateful to the organizers and participants of the Russian-Belarusian expedition carried out within the framework of a part of the research work "Integration-SG-3.2.5.1" as well as the crew of the "Kurilgeo" ship for invaluable assistance in field work on the Kuril Islands.

В настоящем сообщении, основанном на спутниковых данных и результатах визуальных наблюдений, рассмотрены особенности активности вулканов Чиринкотан и Пик Сарычева в 2021 г. К сожалению, привести здесь спутниковые снимки нецелесообразно, ввиду того что они имеют низкое разрешение и при представлении в печатном и/или цифровом виде неинформативны. Визуальные наблюдения проводились участниками российско-белорусской научно-исследовательской экспедиции в рамках составной части НИР «Интеграция-СГ-3.2.5.1.», проходившей на Курильских островах с 27 июля по 23 августа 2021 г. В полевых исследованиях принимали участие сотрудники следующих организаций: НИИ Космических систем им. А.А. Максимова – филиал АО «Государственный космический научнопроизводственный центр имени им. М.В. Хруничева» (г. Юбилейный), Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск), Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск).

Активность вулкана Чиринкотан в 2021 г.

Вулкан Чиринкотан (абс. выс. – 724 м) представляет собой остров-вулкан, расположенный в 45 км к северо-западу от о. Шиашкотан (рис. 1), в пределах западной вулканической зоны. Вершина вулкана образована крупным (диаметр ~800 м) кратером, открытым на югозапад и переходящим в широкую (350–450 м) рытвину, доходящую до уреза воды. В кратере расположен действующий аппарат – экструзивный купол с центральным кратером и потоками лав (рис. 2). Исторические извержения влк. Чиринкотан происходили в 1760, 1878– 1889(?), 1955(?), 1979–1980, 2004, 2013–2015,



Рис. 2. Экструзивный купол влк. Чиринкотан, вид с 3С3, 6 августа 2021 г. *Фото А.А. Ломако* **Fig 2.** Extrusive dome of Chirinkotan volcano, the view from WWS, August 6, 2021. *Photo by A.A. Lomako*

2016, 2017 гг. [Горшков, 1967; Иванов и др., 1979; Rybin et al., 2004; Рыбин и др., 2017 a, б; Чибисова и др., 2018].

В 2021 г. 8 августа в 06:45 UTC (Coordinated Universal Time – всемирное координированное время) VAAC (Volcanic Ash Advisory Center – Консультативный центр по вулканическому пеплу) Токио по спутниковым данным Нітаwari-8 зафиксировал на вулкане Чиринкотан взрыв, поднявший пепловую колонну на высоту 2.5 км н.у.м. В течение следующих дней – 9, 10, 14, 15, 17, 18, 22, 23 августа 2021 г. происходили эксплозии на высоту от 1.5 до 4.5 км н.у.м. (рис. 3). Пепловые облака перемещались преимущественно на югозапад, запад, юго-восток и восток. Наиболее



Рис. 3. Хронология вулканических взрывов по данным VAAC Токио. Цифрой на графике указано количество вулканических взрывов за сутки.

Fig. 3. Chronology of volcanic explosions by the data of Tokyo VAAC. Figure on the graphic is a number of volcanic explosions during a day.

напряженно вулканическая активность протекала 14 и 15 августа, в течение этих дней произошло наибольшее количество (рис. 3) вулканических взрывов на максимальную высоту, а площадь пепловых облаков достигала 7807.7 км² [Гирина и др., 2021].

6 августа 2021 г. (за 2 дня до извержения) на вершину вулкана поднимались участники экспедиции, проводившие там спектрозональные исследования: Г.В. Коровин, А.Н. Королев, И.А. Кириллов, Ю.Г. Лаухина, С.В. Павлов, А.А. Ломако, Г.С. Литвинович. В это же время участники экспедиции Р.В. Жарков, А.С. Корытко, А.А. Москвитин и Е.А. Моисеенко осуществили обход острова на лодке и провели визуальные наблюдения с борта судна «Курилгео», в ходе которых отметили характерную для вулкана интенсивную фумарольную активность (рис. 4). Вечером 8 августа с охотоморского побережья о. Шиашкотан участники экспедиции отмечали усиление активности влк. Чиринкотан: наблюдались слабые эксплозии и постоянная интенсивная парогазовая деятельность. Также по южному склону вулкана сходили небольшие пирокластические потоки, при этом низкий пепловый шлейф от вулкана протягивался более чем на 20 км в южном направлении (рис. 4).

13 августа, при выполнении плановых работ на влк. Кунтоминтар (южная часть о. Шиашкотан), участники экспедиции провели визуальные наблюдения за парогазовой



Рис. 4. Вид на вулкан Чиринкотан с о. Шиашкотан, 8 августа в 20:34 по сахалинскому времени. Расстояние до вулкана около 45 км. *Фото Р.В. Жаркова*

Fig. 4. View of Chirinkotan volcano from Shiashkotan Island, August 8, 20:34 Sakhalin time. Distance to the volcano is about 45 km. *Photo by R.V. Zharkov*

активностью влк. Чиринкотан. На протяжении нескольких часов фиксировалась интенсивная сольфатарная деятельность, сопровождаемая поступлением незначительного количества пепла, высота подъема парогазовых струй над кратером достигала 400–500 м (рис. 5). 14 августа в 13:15 по сахалинскому времени с рейда о. Шиашкотан удалось наблюдать



сход пирокластического потока по южному склону вулкана, продолжившего перемещение по прилегающей акватории более чем на 1 км. Сплошной покров низкой облачности, начинавшейся с высоты ~800 м, не позволял оценить высоту подъема пепловой колонны. В южную сторону протянулся пепловый шлейф, видимая протяженность которого составила более 15 км, скорость распространения достигала 300–330 м/мин.

Активность вулкана Пик Сарычева в 2021 г.

Вулкан Пик Сарычева (абс. выс. 1446 м) занимает северо-западную часть о. Матуа (рис. 1). Вулканическая постройка представляет собой типичный стратовулкан с вершинным кратером. Извержения вулкана происходили в 1765±5, 1878–1879, 1923, 1928, 1930, 1946, 1954, 1960, 1976, 2009, 2017–2018, 2020– 2021 гг. [Андреев и др., 1978; Горшков, 1967; Шилов, 1962; Rybin et al., 2011; Дегтерев, Чибисова, 2021].

В 2020-2021 гг. имело место не совсем характерное для влк. Пик Сарычева извержение: с декабря 2020 г. до середины января 2021 кратер вулкана заполнялся лавой, после чего через расщелину в северо-северо-западной части началось ее излияние, продолжавшееся примерно до начала февраля. Общая длина излившегося лавового потока составила 2 км при ширине 80-90 м [Дегтерев, Чибисова, 2021]. После этого на протяжении 2021 г. по данным сервисов MOUNTS (http://www. mounts-project.com/home; [Valade et al., 2019]) и MIROVA (http://www.mirovaweb.it/) регулярно отмечались термальные аномалии. Однако никаких признаков эксплозивной активности идентифицировать не удалось.

29 июня в 13:20 UTC по данным Нітаwari-8 VAAC Токио был зафиксирован пепловый выброс на высоту 3 км н.у.м. Шлейф распространялся в западно-северо-западном направлении на 30 км от вулкана. Следующий выброс произошел 1 июля в 05:10 UTC, его высота составила 3 км н.у.м. Пепловый шлейф простирался на 93 км в юго-восточном направлении (азимут 113°) со скоростью порядка 31 км/ч (использованы спутниковые данные из центра коллективного пользования «ИКИмониторинг» информационного сервиса «ВЕ-ГА-Science» [Лупян и др., 2015]). Во время эксплозий и перед ними наблюдались термальные аномалии: 25, 29, 30 июня, 1 июля 2021 г. В июле (4, 7, 9, 12, 17–19, 26, 27, 29, 30) также фиксировались слабые термальные аномалии [http://www.mirovaweb.it/; http://www.mountsproject.com/home].

5 августа экспедиционное судно «Курилгео» проходило у берегов о. Матуа. Вулкан Пик Сарычева находился в состоянии покоя, характерной для него парогазовой активности не наблюдалось (рис. 6 а). 6 августа в 14:30, стоя на рейде о. Чиринкотан, участники экспедиции отметили единичный выброс из кратера влк. Пик Сарычева, поднявший пепло-газовый столб на 750–800 м над кратером (рис. 6 б). После этого никаких визуально видимых признаков вулканической активности не отмечалось. На имеющихся в свободном доступе спутниковых снимках данный эпизод идентифицировать не удалось.



Рис. 6. Вулкан Пик Сарычева: (а) 5 августа в 19:54 (по сахалинскому времени), вид с северо-запада. Фото *Р.В. Жаркова*; (б) 6 августа в 14:32 (по сахалинскому времени), вид с рейда о. Чиринкотан. Фото А.А. Москвитина **Fig. 6.** Sarychev Peak volcano: (а) August 5, at 19:54 (Sakhalin time), view from north-west. *Photo by R.V. Zhark*ov; (б) August 6, at 14:32 (Sakhalin time), view from raid of Chirinkotan Isl. *Photo by A.A. Moskvitin*

В конце ноября произошло последнее на текущий момент (15.12. 2021) эксплозивное событие за 2021 г.: по данным сервиса MOUNTS (http://www.mounts-project.com/ static/data_mounts/sarychevpeak/2021/sarchevpeak_20211126 T004949_B4B3B2+B12B11B8A.png), 26 ноября в 00:49 UTC на снимке Sentinel-2 (SWIR) зафиксирована термальная аномалия и слабый пепловый выброс. На спутниковом изображении был запечатлен начальный момент выброса, поэтому его высоту определить не удалось.

Выводы

1. В период с 8 по 23 августа 2021 г. происходило умеренное (VEI 2 поVolcanic Explosivity Index) эксплозивное извержение вулкана Чиринкотан. За это время зарегистрировано 11 вулканических взрывов на высоту от 1.5 до 4.5 км н.у.м. Произошедшее событие по своим параметрам схоже с предыдущими извержениями вулкана, имевшими место в 2013–2015, 2016, 2017 гг.

2. На вулкане Пик Сарычева 29 июня, 1 июля, 6 августа и 26 ноября 2021 г. зафиксированы единичные, относительно слабые выбросы на высоту около 2.2–3 км н.у.м. (VEI 1). Скорее всего, они имели фреатический механизм и были связаны с эффузивным извержением, происходившим с декабря 2020 по февраль 2021 г., когда кратер и жерло вулкана оказались запечатаны лавой. В течение года подобные события, вероятно, также имели место, но не были зарегистрированы из-за небольшой высоты и малой концентрации пепла.

Список литературы

1. Андреев В.Н., Шанцер А.Е., Хренов А.П. и др. **1978.** Извержение вулкана Пик Сарычева в 1976 г. *Бюл. вулканологических станций*, 55: 35–40.

2. Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Кашницкий А.В., Уваров И.А., Романова И.М., Сорокин А.А., Мальковский С.И., Королев С.П., Крамарева Л.С. **2021.** Спутниковый мониторинг эксплозивного извержения вулкана Чиринкотан (Северные Курилы) в 2021 г. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 18(5): 321–327.

3. Горшков Г.С. 1967. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 287 с.

4. Дегтерев А.В., Чибисова М.В. **2021.** Активизация вулкана Пик Сарычева в 2020–2021 гг. (о. Матуа, Центральные Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 5(2): 167–171. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.167-171

5. Иванов Б.В., Кирсанов И.Т., Хренов А.П. и др. **1979.** Действующие вулканы Камчатки и Курильских островов в 1978–1979 гг. Вулканология и сейсмология, 6: 94–100.

6. Лупян Е.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. **2015.** Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 12(5): 263–284.

7. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В. **2017а.** Активность вулкана Чиринкотан (о. Чиринкотан, Северные Курильские острова) в 2013–2016 гг. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 14(4): 76–84. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-4-76-84

8. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В., Гурьянов В.Б. **20176.** Вулканическая активность на Курильских островах в XXI в. Вестник ДВО РАН, 1: 51–61.

9. Чибисова М.В. Рыбин А.В., Дегтерев А.В. **2018.** Извержение вулкана Чиринкотан в 2017 году по спутниковым данным Himawari-8. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 15(4): 112–118. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-112-118

10. Шилов В.Н. 1962. Извержение вулкана Пик Сарычева в 1960 году. Труды СахКНИИ, 12: 143-149.

11. Rybin A., Chibisova M., Webley P. et al. **2011.** Satellite and ground observations of the June 2009 eruption of Sarychev Peak volcano, Matua Island, Central Kuriles. *Bull. of Volcanology*, 73(4): 40–56. https://doi.org/10.1007/s00445-011-0481-0

12. Rybin A.V., Karagusov Y.V., Izbekov P.E. et al. **2004.** Monitoring of active volcanoes of the Kurile Islands: Present and future. In: *The 2nd International Conf. on Volcanic Ash and Aviation Safety, June 21–24, Washington, USA*, p. 55–61.

13. Valade S., Ley A., Massimetti F., D'Hondt O., Laiolo M., Coppola D., Loibl D., Hellwich O., Walter T.R. **2019.** Towards global volcano monitoring using multisensor sentinel missions and artificial intelligence: The MOUNTS monitoring system. *Remote Sensing*, 11(13): 1528. https://doi.org/10.3390/rs11131528

References

1. Andreev V.N., Shantser A.E., Khrenov A.P. et al. **1978.** [The Sarychev Peak volcano eruption in 1976]. *Byulleten' vulkanologicheskikh stantsiy* [*Bull. of volcanological stations*], 55: 35–40. (In Russ.).

2. Girina O.A., Manevich A.G., Melnikov D.V., Nuzhdaev A.A., Kashnitskii A.V., Uvarov I.A., Romanova I.M., Sorokin A.A., Malkovsky S.I., Korolev S.P., Kramareva L.S. **2021.** Satellite monitoring of the explosive eruption of Chirinkotan volcano (Northern Kuriles) in 2021. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 18(5): 321–327. (In Russ.).

3. Gorshkov G.S. **1967.** [Volcanism of the Kuril island arc]. Moscow: Nauka, 287 p. (In Russ.). URL: http://repo.kscnet.ru/156/1/Gorshkov_1967.pdf (accessed 01.12.2021).

4. Degterev A.V., Chibisova M.V. **2021.** Activation of Sarychev Peak volcano in 2020–2021 (Matua Isl., the Central Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 5(2): 167–171. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.167-171

5. Ivanov B.V., Kirsanov I.T., Khrenov A.P. et al. **1979.** Deystvuyushchie vulkany Kamchatki i Kuril'skikh ostrovov v 1978–1979 gg. [Active volcanoes of Kamchatka and Kuril Islands in 1978–1979]. *Vulkanologiya i seysmologiya*, 6: 94–100. (In Russ.).

6. Loupian E.A., Proshin A.A., Bourtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskiy A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Suchugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A. **2015.** IKI Center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 12(5): 263–284. (In Russ.).

7. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V. **2017a.** Activity of Chirinkotan volcano (Chirinkotan Isl., the Northern Kuriles) in 2013–2016. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space, 14(4): 76–84. (In Russ.). https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-4-76-84

8. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V., Guryanov V.B. **20176.** Volcanic eruptions in the Kuril Islands during XXI century. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 1: 51–61. (In Russ.).

9. Chibisova M.V., Rybin A.V., Degterev A.V. **2018.** The eruption of Chirinkotan Volcano in 2017 according to Himawari-8 satellite data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 15(4): 112–118. (In Russ.). https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-112-118

10. Shilov V.N. 1962. [The eruption of Sarychev Peak volcano in 1960]. Trudy SakhKNII, 12: 143–149.

11. *Rybin A., Chibisova M., Webley P. et al.* **2011.** Satellite and ground observations of the June 2009 eruption of Sarychev Peak volcano, Matua Island, Central Kuriles. *Bull. of Volcanology*, 73(4): 40–56. https://doi.org/10.1007/s00445-011-0481-0

12. Rybin A.V., Karagusov Y.V., Izbekov P.E. et al. **2004.** Monitoring of active volcanoes of the Kurile Islands: Present and future. In: *The 2nd International Conf. on Volcanic Ash and Aviation Safety, June 21–24, Washington, USA*, p. 55–61.

13. Valade S., Ley A., Massimetti F., D'Hondt O., Laiolo M., Coppola D., Loibl D., Hellwich O., Walter T.R. **2019.** Towards global volcano monitoring using multisensor sentinel missions and artificial intelligence: The MOUNTS monitoring system. *Remote Sensing*, 11(13): 1528. https://doi.org/10.3390/rs11131528

Сведения об авторах

ДЕГТЕРЕВ Артем Владимирович (https://doi.org/0000-0001-8291-2289), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, d a88@mail.ru

ЧИБИСОВА Марина Владимировна (https://doi.org/0000-0003-0677-6945), старший научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, m.chibisova@imgg.ru

ЖАРКОВ Рафаэль Владимирович (https://doi.org/0000-0002-9753-0627), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, rafael_zharkov@mail.ru

About Authors

DEGTEREV Artem V. (https://doi.org/0000-0001-8291-2289), Cand. of Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, d a88@mail.ru

CHIBISOVA Marina V. (https://doi.org/0000-0003-0677-6945), Senior Researcher, Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, m.chibisova@imgg.ru

ZHARKOV Rafael V. (https://doi.org/0000-0002-9753-0627), Cand. of Sci. (Geography), Leading Researcher, Laboratory of volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, rafael_zharkov@mail.ru

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.845

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.361-377

Гидрогеохимические критерии поиска и разработки углеводородных месторождений: обзор, анализ и перспективы использования на острове Сахалин

© 2021 О. А. Никитенко*, В. В. Ершов

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: nikitenko.olga@list.ru

Резюме. В работе обсуждаются направления гидрогеохимических исследований, используемых для решения актуальных задач нефтегазовой отрасли, таких как оценка перспектив нефтегазоносности территорий, локализация зон нефтегазонакопления, прогноз фазового состава углеводородных залежей, контроль разработки месторождений углеводородов и др. На основе литературных данных выполнен анализ и систематизация основных гидрогеохимических показателей подземных вод, имеющих нефтепоисковую значимость, а также применяемых уже на этапе разработки месторождений нефти и газа. Наибольшая эффективность применения гидрогеохимических исследований в нефтепомысловой практике достигается при комплексном использовании различных показателей. На примере исследований нефтегазоносности о. Сахалин показано, что гидрогеохимические сведения середины XX в., полученные устаревшими химико-аналитическими методами, не всегда можно считать достоверными. Для актуализации соответствующих гидрогеохимических данных в этом регионе требуются дополнительные исследования.

Ключевые слова: подземные воды, гидрогеохимические индикаторы, прогноз нефтегазоносности, разработка месторождений углеводородов, о. Сахалин

Hydrogeochemical indicators for the exploration and development of hydrocarbon fields: review, analysis and prospects for use on Sakhalin Island

Olga A. Nikitenko*, Valery V. Ershov

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: nikitenko.olga@list.ru

Abstract. The paper discusses the directions of hydrogeochemical researches used to solve actual problems of the oil and gas industry: assessment of the oil and gas potential of territories, localization of oil and gas trap, prediction of the phase composition of hydrocarbon fields, control the development process of hydrocarbon fields, etc. Based on the literature data, the analysis and systematization of the main hydrogeochemical indicators of groundwater with oil and gas prospecting significance, as well as used already at the stage of development of oil and gas fields, have been carried out. The most efficiency of the application of hydrogeochemical researches in oilfield practice is achieved with the integrated use of various indicators. On the example of researches of the oil and gas potential of Sakhalin Island, it is shown that the hydrogeochemical data of the middle of the 20th century, obtained by outdated chemical analytical methods, cannot always be considered reliable. In this regard, additional researches are required to update the relevant hydrogeochemical data in this region.

Keywords: groundwater, hydrogeochemical indicators, prediction of oil and gas potential, development of hydrocarbon fields, Sakhalin Island

Для цитирования: Никитенко О.А., Ершов В.В. Гидрогеохимические критерии поиска и разработки углеводородных месторождений: обзор, анализ и перспективы использования на острове Сахалин. Геосистемы переходных зон, 2021, т. 5, № 4, с. 361–377. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.361-377 *For citation:* Nikitenko O.A., Ershov V.V. Hydrogeochemical indicators for the exploration and development of hydrocarbon fields: review, analysis and prospects for use on Sakhalin Island. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 361–377. (In Russ., abstr. in Engl.).

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.361-377

Введение

Согласно осадочно-миграционной теории нефтегазообразования подземные воды выступают важным компонентом в процессах генерации, миграции, аккумуляции и деструкции углеводородов [Барташевич и др., 1980; Вассоевич, 1986; Карцев, 1989; Rachinsky, Kerimov, 2015]. В основе этой теории лежит предположение о генетическом единстве нефти, углеводородных газов и глубинных подземных вод, генерируемых на разных стадиях литогенеза. Активное участие подземных вод в формировании и последующей эволюции нефтегазовых месторождений является основой использования гидрогеохимических показателей при поиске, разведке и разработке месторождений нефти и газа. Геохимические показатели подземных вод позволяют охарактеризовать наличие скоплений углеводородов в недрах, их фазовое состояние, а также условия формирования залежи и ее сохранность [Зытнер, Чибисова, 2013; Киреева, Всеволожский, 2013; Новиков, 2017; Boschetti et al., 2016; Grasby et al., 2012; Yu et al., 2020]. Исследования химического состава пластовых вод эффективно применяются также на этапе контроля разработки нефтяных и газовых месторождений, в частности для определения генезиса попутно добываемых вод, прогнозирования обводнения залежи и эксплуатационных скважин, мониторинга отложения солей в продуктивных пластах и в скважинном оборудовании, оценки качества проведенных геолого-технических мероприятий и т.д. [Порошин, Муляк, 2004; Муляк и др., 2007; Serres-Piole et al., 2012].

В качестве гидрогеохимических показателей, имеющих нефтепоисковую значимость, используют различные компоненты ионно-солевого состава подземных вод и их соотношения, а также содержание водорастворенных органических веществ и газов. К наиболее надежным гидрогеохимическим показателям нефтегазоносности относят параметры газонасыщенности подземных вод: содержание метана и его тяжелых гомологов, а также ряда других неуглеводородных газов (азота, углекислого газа, сероводорода, водорода, кислорода, гелия, аргона) и различные их соотношения [Зорькин, 2008]. Наиболее распространенным компонентом водорастворенных газов углеводородных месторождений является метан, его содержание может достигать 10³ см³/л. Не менее важными показателями, указывающими на скопления нефти и газа в недрах, являются повышенные концентрации компонентов водорастворенного органического вещества, среди которых особое внимание отводится содержанию фенолов, карбоновых и нафтеновых кислот, а также низкомолекулярных ароматических углеводородов (преимущественно бензола и толуола) [Карцев, 1989].

По степени информативности гидрогеохимические показатели нефтегазоносности подразделяют на прямые и косвенные [Барташевич и др., 1980]. Прямые показатели нефтегазоносности отражают ореольное рассеяние компонентов в районе залежи, а также процессы биохимического и физико-химического взаимодействия углеводородов с пластовыми водами. Как следствие, вокруг скоплений нефти и газа образуются гидрогеохимические аномалии, обусловленные перераспределением углеводородных компонентов в зонах водонефтяных и водогазовых контактов. Косвенные показатели нефтегазоносности не говорят напрямую о наличии залежей нефти и газа в пределах исследуемой территории, так как генетически не связаны с углеводородами, а лишь несут информацию о существующих в недрах условиях, благоприятных для формирования и сохранения залежи. К прямым индикаторам нефтегазоносности относят компоненты газового состава подземных вод, а также водорастворенного органического вещества и генетически связанных с ним элементов, таких как йод, бор, бром, аммоний. Косвенными признаками наличия нефти и газа в недрах выступают общие гидрохимические показатели, характеризующие минерализацию и тип вод, а также концентрации растворенных в воде минеральных веществ.

Гидрогеохимические методы поиска и разработки месторождений нефти и газа, наряду с газогеохимическими и геофизическими методами, приобретают все большую актуальность благодаря высокой эффективности, оперативности и экономической доступности.

Целью настоящей работы является обзор, систематизация и анализ гидрогеохимических показателей, применяемых на сегодняшний день в нефтепромысловой практике на разных этапах поиска и разработки месторождений нефти и газа, в том числе таких индикаторов нефтегазоносности, которые используются относительно недавно благодаря развитию высокочувствительных методов химико-аналитических исследований. Отдельной задачей в работе является оценка состояния и перспектив использования гидрогеохимических исследований в нефтегазовой отрасли на о. Сахалин.

Гидрогеохимические критерии поиска углеводородных месторождений

Известно, что промышленные скопления нефти и газа связаны с зонами застойного водного режима и затрудненной циркуляции вод – такие гидрогеологические условия обеспечивают изолированность залежи от разрушающего действия вод инфильтрационного генезиса [Карцев, 1989; McMahon et al., 2018]. Косвенными гидрогеохимическими показателями, отражающими степень гидрогеологической закрытости недр, являются величина минерализации и тип вод.

Скопления нефти и газа, как правило, ассоциируются с водами Cl-Ca и HCO₂-Na генетических типов (по классификации В.А. Сулина), характеризующимися преимущественно повышенной минерализацией [Карцев, 1989]. Гидрохимическая классификация В.А. Сулина была разработана специально для подземных вод нефтегазовых бассейнов. Автор выделил четыре генетических типа вод, отвечающих основным природным обстановкам их формирования и локализации в недрах. В соответствии с этой классификацией воды именуются не по преобладающему содержанию анионов и катионов, а на основании значений генетических коэффициентов, которые отражают нарастание в составе концентраций того или иного компонента. Так, к НСО₃-Na типу относятся воды с повышенным содержанием НСО₃, но при этом его концентрация в составе анионов не является доминирующей. Для вод, соответствующих Cl-Ca типу, характерно увеличение содержания Ca²⁺ по мере их метаморфизации. Происхождение пластовых вод Cl-Ca типа объясняют геохимической эволюцией седиментационных вод морского генезиса вследствие их метаморфизации под влиянием диагенетических и эпигенетических процессов [Барташевич и др., 1980; Карцев и др., 1992]. Происхождение же пластовых вод НСО₂-Na типа связывают с гидрохимическими инверсиями в разрезе осадочного бассейна, при этом причины образования таких инверсий до сих пор являются дискуссионными [Киреева, Всеволожский, 2013]. Отметим, что в условиях, благоприятных для формирования и сохранения залежей углеводородов, наблюдается однородность типа и минерализации пластовых вод, тогда как в пределах гидрогеологически раскрытых структур минерализация пластовых вод и, соответственно, другие гидрогеохимические параметры могут значительно варьировать.

Величина минерализации вод, связанных с залежами нефти и газа, может варьировать в широком диапазоне значений. Например, минерализация пластовых вод Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (Тюменская область, Россия) в разных водоносных комплексах изменяется от 3 до 21 г/л [Кошелев и др., 2014]. В то же время в пластовых водах нефтегазового бассейна Ordos (Китай) содержание растворенных солей достигает концентрации крепких рассолов – 268 г/л [Yu et al., 2020]. В ряде случаев высокая минерализация пластовых вод обеспечивается не только процессами их концентрирования и метаморфизации, но и растворением катагенетического галита, широко распространенного в породах коллекторов [Муляк и др., 2007].

В качестве косвенных показателей нефтегазоносности, отражающих характер гидрогеологической закрытости недр, используются также различные коэффициенты метаморфизации вод, позволяющие отличать воды глубинной циркуляции от вод поверхностного происхождения. Степень метаморфизации подземных вод определяется соответствующими значениями генетических коэффициентов – rNa/rCl, (rCl – rNa)/rMg и rCa/rMg, где форма записи «rX» указывает на то, что концентрация какого-либо компонента Х выражена в мгэкв/л. Как правило, при сильной метаморфизации подземных вод значения соотношений (rCl – rNa)/rMg и rCa/rMg повышаются, тогда как величина rNa/rCl, наоборот, снижается. Дополнительным показателем высокой степени гидрогеологической закрытости недр выступают пониженные значения Cl/Br относительно исходного соотношения в морской воде, где оно составляет около 300. Значения указанных генетических коэффициентов позволяют также выявить распространение в пласте-коллекторе инфильтрационных рассолов, образованных растворением галита. Для рассолов такого генезиса величина rNa/rCl составляет около 0.9–1.0, а величина Cl/Br – существенно больше 300 [Серебренникова, 2008].

В настоящее время при гидрогеохимических исследованиях нефтегазоносности широко применяются сведения об изотопном составе (δ^{18} O, δ D) вод, сопутствующих месторождениям нефти и газа. Эти данные позволяют определить генезис попутно добываемых жидкостей, а также оценить степень изоляции углеводородных залежей от разрушающего действия метеорных вод [Engle et al., 2020; McMahon et al., 2018]. Например, по данным [McMahon et al., 2018], для пластовых вод нефтяных месторождений долины San Joaquin (Калифорния, США) изотопные показатели преимущественно демонстрируют обогащение кислородом-18 и обеднение дейтерием относительно стандарта морской воды (SMOW). В этой работе показано, что на формирование изотопного состава пластовых вод существенно влияют смешение с метеорными водами, а также диагенетические процессы – изотопный обмен с глинистыми минералами, в результате которого происходит обогащение вод кислородом-18 и обеднение дейтерием. Для месторождений Eagle Ford Group (Teхас, США) были установлены аналогичные закономерности формирования изотопного состава пластовых вод [Engle et al., 2020]. Моделирование процессов изотопного фракционирования в системе «вода-порода» показало, что обогащение пластовых вод кислородом-18 является следствием изотопного обмена с глинистыми (смектит, иллит) и карбонатными (кальцит) минералами. Кроме того, было выявлено, что при взаимодействии с глинами пластовые воды обедняются по содержанию дейтерия. По данным [Engle et al., 2020], обогащение пластовых вод кислородом-18 возрастает с увеличением глубины их залегания, что обусловлено температурной зависимостью изотопного обмена вод с минералами водовмещающих пород. [Engle et al., 2020] отмечают, что изотопные исследования пластовых вод эффективны для идентификации вод, закачиваемых в залежь для поддержания пластового давления. Заметим, что при изучении обстановок формирования и закономерностей последующей эволюции пластовых вод интерес также могут представлять возможные корреляции между изотопными показателями и содержанием разных химических элементов.

Высокую информативность для оценки перспектив нефтегазоносности территории представляет содержание SO₄²⁻ в подземных водах. В пластовых водах нефтегазовых месторождений практически отсутствуют сульфат-ионы, тогда как по мере удаления от залежи насыщение вод сульфатами возрастает [Карцев, 1989]. Низкое содержание SO₄²⁻ в водах нефтяных и газовых месторождений связано с процессами восстановления сульфатов, протекающими при участии анаэробных бактерий в присутствии органического вещества [Порошин, Муляк, 2004]. Насыщенность пластовых вод сульфатами обычно оценивают с помощью коэффициента сульфатности: rSO₄·100/rC1. При этом важно учитывать, что содержание SO₄²⁻ в водах ограничивается пределом растворимости сульфатсодержащих минералов, который зависит от химического состава вод и от термодинамических условий геохимической системы. Поэтому для более надежной оценки перспектив нефтегазоносности было предложено использовать такой параметр, как степень насыщенности вод сульфатами, который выражается формулой: rSO₄ = 10800/rCa [Барташевич и др., 1980]. Для оценки дефицита насыщения вод сульфатами расчетное значение, полученное по этой формуле, сравнивается с фактической концентрацией сульфат-ионов.

Процессы бактериального восстановления сульфатов оказывают влияние также на образование и накопление в пластовых водах значительных количеств H₂S и CO₂ [Порошин, Муляк, 2004]. Вследствие этого в водах нефтегазоносных районов наблюдаются повышенные концентрации НСО₃-. Поэтому обогащение пластовых вод НСО3- рассматривают часто как показатель скопления в недрах газовых залежей [Новиков, 2017]. Проведенные в работе [Bowles et al., 2011] исследования микробной активности в осадочных отложениях холодных сипов Мексиканского залива показали, что анаэробное окисление углеводородов в кернах, насыщенных метаном, протекает с гораздо большей скоростью, чем в образцах, содержащих примеси нефти. Вероятно, это обусловлено разной интенсивностью протекания процессов окисления жидких и газообразных углеводородов в присутствии сульфатредуцирующих бактерий.

Необходимо отметить, что поисковая значимость содержания в водах HCO₃⁻ и SO₄²⁻ снижается в районах распространения эвапоритовых толщ, представленных карбонатными и сульфатными минералами. На многих месторождениях нефти и газа отмечается загипсованность пород коллекторов [Ханин, 1969]. Соответственно, растворение этих пород может приводить к значительному повышению концентраций SO₄²⁻ в пластовых водах. Кроме того, биохимический процесс сульфатредукции может быть ограничен физико-химическими условиями среды, неблагоприятными для жизнедеятельности сульфатвосстанавливающих бактерий. Основными факторами, подавляющими процессы сульфатредукции, являются повышенная (выше 80-90 °C) температура и минерализация пластовых вод более 100 г/л [Муляк и др., 2007]. В свою очередь, в «пустых» структурах из-за растворения карбонатных пород в подземных водах могут быть значительно повышены концентрации HCO_3^- , что может быть ошибочно проинтер-претировано как признак нефтегазоносности. Таким образом, концентрации HCO_3^- и SO_4^{2-} в подземных водах не всегда могут считаться надежными показателями наличия или отсутствия залежей углеводородов.

Показательными признаками наличия скоплений нефти и газа в недрах выступают повышенные концентрации аммония, йода, и брома в подземных водах [Смирнова, 2012; Özdemir, 2018; McMahon et al., 2018]. Считается, что наличие указанных компонентов в подземных водах генетически связано с углеводородами и органическим веществом в целом, что позволяет относить данные компоненты к прямым индикаторам нефтегазоносности [Карцев, 1989].

Обогащение подземных вод аммонием обусловлено процессами разложения и последующим переходом азоторганических компонентов нефтей в воды, контактирующие с залежами. В частности, для нефтегазовых месторождений Каспийского бассейна на территории вала Карпинского установлено, что содержание аммония в пластовых водах может зависеть от состава углеводородов [Смирнова, 2012]. Это объясняется здесь увеличением в нефтях азотных соединений с утяжелением углеводородной фракции: во фракциях до 200 °С азот присутствует в следовых концентрациях, а во фракциях выше 325 °С – достигает 1.5 %. Для обсуждаемых месторождений наиболее высокое содержание аммония наблюдается в приконтурных водах – до 120–150 мг/л, а в некоторых случаях и 200-300 мг/л, что в несколько раз превышает фоновый показатель на данной территории. Содержание аммония закономерно уменьшается по мере удаления от залежи – влияние углеводородов отмечается на расстоянии от 0.5 до 4 км [Смирнова, 2012]. Концентрации аммония в пластовых водах могут иметь и более высокие значения. Например, в подземных водах месторождения Belridge (Калифорния, США) они достигают 460 мг/л [McMahon et al., 2018]. При этом необходимо учитывать, что повышенные концентрации аммония в подземных водах могут быть связаны не только с процессами взаимодействия подземных вод с нефтью, но и с разложением органического вещества, заключенного в осадочных отложениях [McMahon et al., 2018].

Исследования закономерностей распределения йода в водах, сопутствующих углеводородным залежам, показывают, что основным источником поступления данного элемента в пластовые воды выступают богатые органическим веществом осадочные отложения морского генезиса [Özdemir, 2018]. Обогащение подземных вод йодом связывают с процессами преобразования органического вещества на различных стадиях литогенеза осадочных отложений, поскольку йод, являясь по своему происхождению биофильным элементом, входит в состав органических комплексов водовмещающих пород. Иод поступает в поровые воды уже на ранних стадиях диагенеза осадочных отложений при разложении органического вещества. По мере погружения осадков на глубину содержание йода в водах постепенно возрастает. В работе [Ozdemir, 2018] отмечается, что наиболее существенное обогащение подземных вод йодом происходит на стадии термического созревания органического вещества. Анализ имеющихся данных для некоторых нефтегазовых месторождений обнаруживает достаточно широкий диапазон концентрации йода в пластовых водах – от 0.75 до 81 мг/л (рис. 1). Видно, что формирование пластовых вод соответствует модели смешения соленых вод и рассолов с пресными водами инфильтрационного генезиса. Кроме того, следует обратить внимание, что по соотношению концентраций хлора и йода воды нефтегазовых месторождений весьма сходны с водами грязевых вулканов.

С органическим веществом осадочных отложений может быть связана и значительная часть брома в пластовых водах. Возможность извлечения брома из комплекса органических соединений морских осадков в поровые воды была доказана экспериментальными исследованиями [Красинцева, 1968]. В ходе этих экспериментов установлено, что под влиянием повышенных температур и давления из морских осадков отжимаются растворы, обогащенные бромом. При этом отмечено, что концентрация брома в поровых водах коррелировала с содержанием органического углерода в осадочных отложениях. В связи с этим для вод нефтегазовых месторождений характерно существенное обогащение бромом относительно морской воды, т.е. пониженные значения отношения Cl/Br (рис. 2).

При оценке перспектив нефтегазоносности территории одной из важных задач является прогноз фазового состава залежей. Как известно, тип исходной биомассы предопределяет не только генерационный потенциал органического вещества нефтематеринских пород, но и вид основных генерируемых продуктов - жидкость или газ [Чахмачев, Виноградова, 2003]. Прогноз фазового состояния углеводородных систем основывается на идентификации фациально-генетического типа органического вещества нефтематеринских толщ. Различают два основных типа керогена – аквагенный (сапропелевый, типы I и II) и террагенный (гумусовый, тип III). Согласно классификации, предложенной в работе [Тиссо, Вельте, 1981], кероген I типа генерируется преимущественно за счет водорослевых и микробных липидов; II типа – в результате отложения и накопления морских организмов; III типа – в основном из остатков наземной растительности. Кероген первого типа в пла-

стовых условиях продуцирует газонефтяные залежи, кероген второго типа – преимущественно нефтяные скопления, а кероген третьего типа – углеводородные газы. Для получения информации о генетическом типе органического вещества нефтематеринских пород обычно применяют оптические и физико-химические исследования керогена. Альтернативой или дополнением к данным методам могут выступать и гидрогеохимические исследования пластовых вод.

В работе [Worden, 1996] была обнаружена связь между типом керогена нефтематеринских пород и соотношением концентраций йода и брома в пластовых водах. На основании этой связи в [Özdemir, 2018] по данным для пластовых вод нефтегазового бассейна юго-восточной Анатолии (Турция) была построена соответствующая дискриминационная диаграмма и показано, что преобладание в осадочном бассейне керогена второго типа приводит к более высоким концентрациям брома в пластовых водах, тогда как на концентрацию йода тип нефтематеринской породы не оказывает заметного влияния. На этом основании отношение I/Br было предложено использовать для определения генетического потенциала нефтематеринских пород. Отметим, что применение диаграммы из [Özdemir, 2018] для прогнозирования типа углеводородов (нефти или газа) в бассейне показывает хорошую эффективность. Мы нанесли на диаграмму Özdemir имеющиеся данные для вод из разных нефтегазоносных районов России (рис. 3). Для рассматриваемых в настоящей работе пластовых вод нефтегазоносных районов соблюдается предполагаемая связь между отношением I/Br и типом извлекаемых углеводородов. Исключением выступают месторождения о. Сахалин, для которых такая связь соблюдается не всегда. Мы полагаем, что это может быть обусловлено аналитической ошибкой измерений I и Br в пластовых



Рис. 1. Соотношение концентраций СІ и І в поверхностных и пластовых водах разных нефтегазоносных районов: 1 – пластовые воды Тимано-Печерской нефтегазовой области [Балашева, Фарносова, 2017; Зытнер, Чибисова, 2013]; 2 – пластовые воды Енисей-Хатангского регионального прогиба [Новиков, 2017]; 3 – пластовые воды нефтегазовых месторождений о. Сахалин [Григель, 1959; Цитенко, Евстафьева, 1959]; 4 – термоминеральные воды Дагинского месторождения (о. Сахалин) [Григель, 1959]; 5 – речные воды; 6 – галит; 7 – морская вода. Цифрами 8, 9, 10 обозначены области, отвечающие водам грязевых вулканов, соленым водам и рассолам соответственно [Воschetti et al., 2011]. Линиями обозначены наиболее распространенные гидрогеохимические процессы: сплошной линией – концентрирование морской воды, пунктирными – смешение вод различного генезиса, штрихпунктирной – растворение галита метеорными водами.

Fig. 1. The ratio of Cl and I concentrations in surface and formation waters of different oil and gas regions: 1 – formation waters of the Timan-Pechora oil and gas province [Balasheva, Farnosova, 2017; Zytner, Chibisova, 2013]; 2 – formation waters of the Yenisei-Khatanga regional trough [Novikov, 2017]; 3 – formation waters of oil and gas fields on Sakhalin Island [Grigel, 1959; Tsitenko, Evstafieva, 1959]; 4 – thermomineral waters of Daginsky deposit (Sakhalin Island) [Grigel, 1959]; 5 – river waters; 6 – halite; 7 – seawater. The numbers 8, 9, 10 designate the areas corresponding to the waters of mud volcanoes, salt waters and brines, respectively [Boschetti et al., 2011]. Lines indicate the most common hydrogeochemical processes: the solid line is the seawater evaporation, the dashed lines are the mixing of different genesis waters, the dash-dotted line is the halite dissolution by meteoric waters.

водах о. Сахалин, которые были выполнены еще в середине XX в. устаревшими методами химического анализа. Этот вопрос подробно рассматривается далее в статье.

Еще одним характерным компонентом вод, сопутствующих нефтяным и газовым залежам, является бор. Однако связь между концентрациями бора в подземных водах и наличием залежей нефти и газа в недрах неоднозначна. Это обусловлено тем, что основным источником поступления бора в подземные воды оса-



Рис. 2. Соотношение логарифмов концентраций СІ и Вг в поверхностных и пластовых водах разных нефтегазоносных районов: 1 – пластовые воды Тимано-Печерской нефтегазовой области [Балашева, Фарносова, 2017; Зытнер, Чибисова, 2013]; 2 – пластовые воды Енисей-Хатангского регионального прогиба [Новиков, 2017]; 3 – пластовые воды нефтегазовых месторождений о. Сахалин [Григель, 1959; Цитенко, Евстафьева, 1959]; 4 – минеральные воды Паромайских источников (о. Сахалин) [Григель, 1959]; 5 – термоминеральные воды Дагинского месторождения (о. Сахалин) [Григель, 1959]; 6 – речные воды нефтегазоносных районов о. Сахалин [Григель, 1959], 7 – морская вода. Сплошной линией показано концентрирование морской воды, пунктирными – смешение рассолов с морской водой (а) и пресными водами (б).

Fig. 2. The ratio of logarithms of Cl and Br concentrations in surface and formation waters of different oil and gas regions: 1 – formation waters of the Timan-Pechora oil and gas province [Balasheva, Farnosova, 2017; Zytner, Chibisova, 2013]; 2 – formation waters of the Yenisei-Khatanga regional trough [Novikov, 2017]; 3 – formation waters of oil and gas fields on Sakhalin Island [Grigel, 1959; Tsitenko, Evstafieva, 1959]; 4 – mineral waters of the Paromay thermal springs (Sakhalin Island) [Grigel, 1959]; 5 – thermomineral waters of Daginsky deposit (Sakhalin Island) [Grigel, 1959]; 6 – river waters of oil and gas areas on Sakhalin Island [Grigel, 1959]; 7 – seawater. The solid line shows the seawater evaporation, the dashed lines show the mixing of brines with seawater (a) and mixing with fresh waters (b).

дочных бассейнов выступают песчано-глинистые отложения морского генезиса, а ключевыми факторами, влияющими на перераспределение бора в системе «вода-порода», являются процессы адсорбции-десорбции и реакции перекристаллизации смектита в иллит [Williams et al., 2001a; Köster et al., 2019]. При этом в литературе [Williams et al., 2001b; Martos-Villa et al., 2020] есть сведения о том, что рассеянное органическое вещество, заключенное в осадочных отложениях, также может быть потенциальным источником поступления бора в подземные воды. В частности, утверждается, что термическое разложение керогена может способствовать повышению содержания растворенного бора в водах осадочных бассейнов, связанных со скоплениями углеводородов.



Рис. 3. Соотношения концентраций Br и I в поверхностных и пластовых водах разных нефтегазоносных районов, нанесенные на диаграмму из [Özdemir, 2018], которая отражает связь между типом керогена и соотношением I/Br в водах нефтегазовых месторождений. 1 – пластовые воды Тимано-Печерской нефтегазовой области [Балашева, Фарносова, 2017; Зытнер, Чибисова, 2013]; 2 - пластовые воды Енисей-Хатангского регионального прогиба [Новиков, 2017]; 3 – пластовые воды нефтегазовых месторождений о. Сахалин [Григель, 1959; Цитенко, Евстафьева, 1959]; 4 - термоминеральные воды Дагинского месторождения (о. Сахалин) [Григель, 1959]; 5 – морская вода. Пунктирными линиями показаны области, отвечающие указанным типам керогена; сплошной линией – концентрирование морской воды. Fig. 3. The ratio of Br and I concentrations in surface and formation waters of different oil and gas regions plotted on a diagram from [Özdemir, 2019], that shows the relationship between type of kerogen and the I/Br ratio in the formation waters. 1 - formation waters of the Timan-Pechora oil and gas province [Balasheva, Farnosova, 2017; Zytner, Chibisova, 2013]; 2 - formation waters of the Yenisei-Khatanga regional trough [Novikov, 2017]; 3 - formation waters of oil and gas fields on Sakhalin Island [Grigel, 1959; Tsitenko, Evstafieva, 1959]; 4 – thermomineral waters of Daginsky deposit (Sakhalin Island) [Grigel, 1959]; 5- seawater. The dotted lines show the areas corresponding to the indicated kerogen types; the solid line shows the seawater evaporation.

Однако необходимо учитывать, что температурные условия, при которых проходит перекристаллизация смектита в иллит, совпадают с температурами нефтегазогенерации. Высокие концентрации бора в грязевулканических водах (порядка 10² мг/л) объясняют чаще всего катагенетической трансформацией глинистых минералов. Заметим, что в подземных водах, сопутствующих нефтегазовым залежам, содержание бора может изменяться в широком диапазоне значений. Например, в пластовых водах Енисей-Хатангского прогиба концентрации бора варьируют от 0.25 до 60 мг/л [Новиков, 2017]. Повышенные концентрации бора в пластовых водах могут сохраняться на расстоянии 500-1000 м от залежи [Смирнова, 2012]. Таким образом, обогащение подземных вод бором следует рассматривать не только как показатель, отражающий диагенетические преобразования осадочных отложений, но и как результат термического созревания органического вещества и нефтегазогенерации.

Исследования подземных вод, связанных с месторождениями нефти и газа, показывают, что вокруг залежей углеводородов могут формироваться геохимические аномалии редких и рассеянных элементов (например, V, Ni, Cr, Cu, Co, Mo, Sn, Pb и др.). Эти аномалии, по мнению [Карцев, 1989], можно использовать в качестве косвенных гидрохимических показателей нефтегазоносности. Обогащение приконтурных вод такими элементами происходит в результате их взаимодействия не только с водовмещающими породами, но и непосредственно с самими углеводородами. Последние в своем составе содержат широкий спектр металлов, особенно редкоземельные элементы, что было доказано экспериментальными исследованиями [Akinlua, Smith, 2010]. Связь между керогеном и концентрациями Си и V в пластовых водах месторождения Tuscaloosa Marine Shale (США) отмечается также в работе [Hoffmann, Borrok, 2020]. При этом необходимо учитывать возможность поступления редких металлов в подземные воды, сопутствующие нефтегазовым залежам, из других источников, никак не связанных с процессами нефтегазообразования. Например, в микрокомпонентном составе попутно добываемых вод месторождения Оймаша (Казахстан) наблюдаются аномально высокие концентрации таких металлов, как Li, Rb, Cs, Sr, поступление которых связывают с процессами дегазации более глубоких горизонтов, где развиты гранитные интрузии [Ларичев и др., 2020].

ствительных химико-аналитических методов (масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой), в настоящее время становится доступным определение в пластовых водах содержания редкоземельных элементов (РЗЭ). Однако такие исследования представляют собой нетривиальную аналитическую задачу, поскольку определение микрокомпонентного состава пластовых вод может быть затруднено влиянием матричных эффектов, вызванных повышенной минерализацией вод, а также присутствием растворенных углеводородных соединений. Исследования содержаний РЗЭ в подземных водах, связанных с месторождениями нефти и газа, показывают, что для них характерна положительная европиевая аномалия при нормировании к североамериканскому сланцу (NASC) [Nye et al., 2017] и хондриту [Новиков и др., 2019]. Кроме того, в работе [Nye et al., 2017] выявлено, что пластовые воды проявляют небольшую отрицательную цериевую аномалию при нормировании к NASC. При нормировании содержаний РЗЭ на кларк морской воды профиль приобретает несколько другой вид – положительная европиевая аномалия сохраняется, но при этом аномалия церия становится положительной и появляется небольшая положительная аномалия гадолиния. Авторы работы [Nye et al., 2017] полагают, что формирование аномалий относительно NASC отражает взаимодействие пластовых вод с водовмещающими породами, в результате которого Еи из вмещающих пород переходит в водный раствор, а Се, наоборот, поглощается вмещающими породами.

Благодаря развитию новых высокочув-

Продукты трансформации углеводородов в подземных водах помимо поискового значения представляют интерес как потенциальный источник загрязнения гидросферы. Исследования естественной миграции нефти в соседние водоносные горизонты и на участках аварийных разливов нефтепродуктов показывают, что деструкция углеводородов вызывает существенные изменения гидрогеохимических показателей грунтовых вод. Процессы деградации углеводородов приводят к образованию в грунтовых водах шлейфов нефтяных метаболитов, идентификация которых позволяет устанавливать масштабы загрязнения, а также прогнозировать его дальнейшее распространение [Путилина и др., 2019]. Собственно, по этим же самым признакам можно судить и о наличии естественных просачиваний нефти, т.е. использовать их для поиска углеводородных месторождений. Количество образующихся в водах метаболитов зависит от развития окислительно-восстановительных условий, наличия конечных акцепторов электронов, а также от типа исходных углеводородов. Исследованиями грунтовых вод, загрязненных нефтепродуктами, локализованных у источника загрязнения, выявлено снижение концентраций растворенного кислорода, NO₂-, SO₄²⁻ при естественной биодеградации углеводородов. В то же время содержание растворенных в водах CO_2 и CH_4 , а также HCO_3^- , Mn, Fe в этой области увеличивается [Guo et al., 2020; Chen et al., 2010; Marić et al., 2019]. Кроме того, по мере удаления от очага загрязнения в грунтовых водах снижается содержание органических загрязнителей (бензола, толуола, этилбензола, ксилола), понижается рН вод и окиспотенциал. лительно-восстановительный В работе [Marić et al., 2019] особо отмечается, что микробиологическая активность на участке деградации углеводородов способствует развитию процессов выветривания алюмосиликатных пород, в результате чего грунтовые воды обогащаются SiO₂ и Al.

Гидрогеохимические показатели контроля разработки углеводородных месторождений

Исследования химического состава пластовых вод проводятся не только для выявления индикаторов нефтегазоносности территории, но и для оперативного контроля разработки месторождений нефти и газа. Гидрогеохимическое сопровождение разработки углеводородных месторождений способствует решению ряда важных практических задач в целях оптимизации процесса извлечения нефтегазовой продукции и предотвращения рисков возникновения неблагоприятных явлений, осложняющих геолого-промысловые работы. Гидрохимические исследования позволяют осуществлять прогноз обводнения продуктивных пластов; устанавливать генезис вод, извлекаемых совместно с продукцией добывающих скважин, и долевое соотношение в них пластовых и закачиваемых вод; производить оценку взаимосвязей нагнетательных и добывающих скважин; отслеживать направления и скорости перемещения пластовых и закачиваемых вод; контролировать качество проведенных геолого-технических мероприятий и т.д. [Муляк и др., 2007].

На начальных стадиях разработки месторождений одной из главных задач является прогноз обводнения продуктивных пластов, который основывается не только на замерах дебита водопроявлений в скважинах, но и на последующих химико-аналитических исследованиях вод, добываемых совместно с углеводородами. Важным вопросом при этом выступает идентификация генетических типов попутно извлекаемых вод, поскольку в процессе освоения месторождений совместно с извлекаемой продукцией могут поступать полигенные жидкости, состоящие из смеси пластовых, закачиваемых, конденсатогенных, технических и других вод [Муляк и др., 2007]. В большинстве случаев попутно добываемые воды формируются смешением вод, закачиваемых для искусственного поддержания пластового давления в нефтяных залежах, и остаточных пластовых вод. Для поддержания давления в продуктивных пластах чаще всего используются пресные воды поверхностных водоемов, а в некоторых случаях морская вода, если разрабатываемое месторождение располагается на шельфе или в прибрежной зоне. В связи с этим для определения генезиса попутно добываемых вод наиболее информативны величина минерализации и соотношения определенных компонентов химического состава (генетические коэффициенты). Нередко в качестве основного диагностического показателя попутно добываемых вод используется такой параметр, как плотность водного раствора, который позволяет оперативно выявить изменения минерализации извлекаемых вод и таким образом получить первые сведения об их генетической природе. Наряду с уровнем минерализации пластовых вод отслеживаются значения соотношений rNa/rCl и Cl/Br, которые, как известно, существенно различаются для вод разных генетических типов, что дает возможность установить инфильтрацию вод из внешних источников [Кошелев и др., 2014]. Кроме того, как уже упоминалось выше, пластовые воды нефтегазовых месторождений практически не содержат в своем составе SO²⁻, поэтому повышение значения коэффициента сульфатности вод в процессе разработки месторождения также будет указывать на поступление в систему вод иного генезиса. Дополнительно для определения генезиса попутно добываемых растворов привлекаются сведения о содержании специфических микрокомпонентов [Муляк и др., 2007].

Важное значение имеет не только идентификация разных типов вод в составе попутно добываемых жидкостей, но и их долевое соотношение, которое позволяет, например, оценить степень участия нагнетаемых вод в вытеснении нефти. Как правило, соотношение смешивающихся вод разного генезиса определяется по химическому составу этих вод посредством линейной пропорции. Однако необходимо учитывать, что при смешении пластовых и закачиваемых вод происходит их химическое взаимодействие между собой, а также с породами коллектора. Вследствие возникающего при этом смещения ионных равновесий развиваются процессы осаждения и растворения минеральных солей в пластовых условиях, что может приводить к изменению фильтрационных свойств пород коллекторов. А это, в свою очередь, способствует как преждевременному обводнению добываемой продукции, так и, наоборот – кольматации пород коллекторов и скважинного оборудования.

Кольматация является распространенной проблемой при разработке углеводородных месторождений. Солеотложение в коллекторах, как правило, происходит из-за несовместимости состава закачиваемых вод с исходными пластовыми водами, в результате чего развивается пересыщение вод определенными минералами, выпадающими в осадок при данных условиях. Например, при разработке Осташковичского месторождения (Беларусь) для поддержания пластового давления в залежь нагнетались воды с высокой минерализацией (около 100 г/л). В итоге в стволах добывающих скважин и на промысловом оборудовании наблюдалось развитие отложений галита [Муляк и др., 2007]. Для решения данной проблемы на участках, в пределах которых солеобразование было наиболее выраженным, проводились закачки пресных вод. На образование солей в пластовых условиях также могут оказывать влияние процессы катионного обмена между породами коллектора и закачиваемыми водами. Например, на месторождении Белый Тигр (Вьетнам) закачка морской воды в пласт привела к ионному обмену Na⁺ и Mg²⁺ из воды на Ca²⁺ из кальцита (CaCO₃) и ломонтита (Ca(Si₄Al₂)O₁₂·4H₂O), которые содержались в породах коллектора [Лехов, Киреева, 2019]. Это вызвало существенное увеличение концентрации Ca²⁺ в попутно добываемых водах и привело к отложению ангидрита (CaSO₄) в пластовых условиях. Как следствие, в кол-

370

лекторах из-за заполнения трещин ангидритом снизилась проницаемость фильтрационных потоков, что явилось причиной снижения объемов добычи нефти.

Таким образом, для организации рациональной системы поддержания пластового давления методом заводнения для каждого месторождения обязательно рассчитывается совместимость закачиваемых вод с пластовыми водами и литологическим составом водовмещающих пород. Для прогнозирования изменений химического состава пластовых вод и выпадения минеральных солей в пластовых условиях применяется термодинамическое моделирование физико-химических процессов при различных условиях эксплуатации месторождения.

Исследования гидрогеохимических условий разработки углеводородных месторождений помогают также эффективно решать задачи по отслеживанию направлений и скоростей перемещения нагнетаемой в пласт воды, поскольку воды, закачиваемые для поддержания пластового давления, существенно отличаются по химическому составу от исходных пластовых рассолов [Муляк и др., 2007]. В настоящее время активно развивается метод трассирования фильтрационных потоков различными химическими индикаторами [Winniford, Dunkle, 2020]. Принцип данного метода заключается в добавлении в нагнетаемые воды растворовиндикаторов для последующего отбора проб воды из окружающих добывающих скважин и определения в них наличия и объема трассирующего материала. Метод индикаторных исследований позволяет решать многие производственные вопросы: устанавливать положения водонефтяных контактов, отслеживать направления движений нагнетаемых вод для предотвращения их преждевременного прорыва в добывающие скважины, выявлять зоны обводнения и зоны, не охваченные воздействием закачиваемых вод, выявлять гидродинамические связи между нагнетательными и добывающими скважинами, управлять распределением нагнетаемых потоков. В качестве индикаторов перемещения пластовых вод используются естественные и искусственные радиоактивные элементы, химические соединения, растворы красителей [Winniford, Dunkle, 2020]. Трассирование фильтрационных потоков радиоактивными метками ограничено изза их высокой экологической опасности. Наиболее широко применяется при отслеживании фильтрационных потоков радиоактивный изотоп водорода – тритий. Сегодня в качестве трассирующих индикаторов вместо опасных химических и радиоактивных веществ рекомендуется использовать природные стабильные изотопы, присутствующие в составе нагнетаемых вод, такие как кислород-18, дейтерий, стронций-87, углерод-13 [Serres-Piole et al., 2012; Winniford, Dunkle, 2020].

Гидрогеохимические исследования в нефтегазоносных районах о. Сахалин

Рассматриваемые в данной работе гидрогеохимические методы поиска и разработки месторождений углеводородов активно применяются как самостоятельно, так и в сочетании с другими методами геологоразведки по всему миру [Akstinat, 2019; Chongxi, Xueming, 1991; Engle et al., 2020; Hoffmann, Borrok, 2020; Sun, Хіе, 2014]. Однако в России эти методы далеко не везде широко используются. В частности, на о. Сахалин, где сконцентрированы крупнейшие запасы нефти и газа в России, исследования по оценке перспектив нефтегазоносности гидрогеохимическими методами практически не проводились после 50-70-х гг. ХХ в. [Цитенко, Евстафьева, 1959; Григель, 1959]. В настоящее время на о. Сахалин и прилегающем шельфе открыто более 70 месторождений нефти и газа Боровиков, 2008; Харахинов и др., 2015], многие из которых находятся на стадии разведки. Это свидетельствует об актуальности проведения соответствующих гидрогеохимических исследований в рассматриваемом регионе.

По результатам гидрогеохимических исследований нефтегазоносных районов о. Сахалин советского периода [Цитенко, Евстафьева, 1959; Григель, 1959], пластовые воды в регионе представлены HCO3-Na, Cl-Ca и Cl-Mg типами (по классификации В.А. Сулина). Они имеют относительно высокую минерализацию, которая, как правило, не превышает соленость морских вод. Для пластовых вод о. Сахалин характерно повышенное содержание типичных для нефтегазоносных областей микрокомпонентов – аммония, йода, бора и брома. Отметим, что наряду с данными о химическом составе пластовых вод в рассматриваемых материалах [Цитенко, Евстафьева, 1959; Григель, 1959] содержатся сведения о составе вод рек, озер и минеральных источников, расположенных в пределах тех геологических структур, которые исследуются на нефть и газ. Эти сведения обычно также используются для оценки перспектив нефтегазоносности. При этом

обращает на себя внимание тот факт, что концентрации брома в водах поверхностных водоемов и минеральных источников здесь часто соизмеримы с концентрациями брома в пластовых водах. При том, что общая минерализация у поверхностных вод, как правило, на 2-3 порядка ниже, чем у пластовых. По этим определениям, например, концентрации брома в пластовых водах Катанглинского месторождения достигают 51 мг/л, Паромайского – 75 мг/л, Охинского – 91 мг/л, Эхабинского месторождения – 117 мг/л. В речных водах содержание брома находится в диапазоне от 16 до 32 мг/л; в минеральных водах Паромайских источников – до 50 мг/л, а в водах Дагинских источников – до 155 мг/л. Как следствие, для вод поверхностных водоемов и минеральных источников получаются значения отношения Cl/Br, которых не может быть в реальности, от десятых долей до первых единиц (рис. 2).

Мы полагаем, что представленные в работах [Цитенко, Евстафьева, 1959; Григель, 1959] результаты определений содержания брома (и, возможно, других водорастворенных компонентов) следует считать сомнительными. Это, вероятно, обусловлено большой аналитической ошибкой измерений, выполненных методами химического анализа, которые на сегодняшний день можно считать устаревшими. Наши исследования химического состава вод Дагинских термоминеральных источников, проведенные с помощью современных химико-аналитических методов (высокоэффективная жидкостная хроматография), показали, что содержание брома в них, как правило, составляет 2-10 мг/л. А соотношение Cl/Br по результатам наших измерений лежит преимущественно в диапазоне 250-450, что близко к аналогичному соотношению для морской воды. Это хорошо согласуется с тем фактом, что Дагинское термоминеральное месторождение территориально приурочено к прибрежной части Ныйского залива. Отметим также, что результаты современных исследований физико-химических параметров Паромайских термальных источников [Жарков и др., 2019] также демонстрируют существенные отличия содержаний брома от данных из материалов [Цитенко, Евстафьева, 1959; Григель, 1959]. Таким образом, актуальным является продолжение и расширение гидрогеохимических исследований нефтегазоносных районов о. Сахалин с помощью современных высокочувствительных и прецизионных методов химического анализа. Очевидно также,

что необходим критический пересмотр данных химико-аналитических определений, полученных в середине прошлого века. Ошибки в определении химического состава поверхностных и подземных вод могут приводить к ложным выводам при оценке нефтегазоносности исследуемой территории.

Заключение

Проблема повышения эффективности поиска и разработки месторождений нефти и газа, особенно в условиях существенного нарастания глубин поиска, а также необходимости вовлечения в разработку остаточных запасов углеводородов, в настоящее время приобретает все большую значимость и актуальность. В этой связи гидрогеохимические методы поиска и разработки углеводородных месторождений, характеризующиеся оперативностью, эффективностью и относительно низкой стоимостью, имеют перспективы для использования в нефтегазовой отрасли. Безусловно, наибольшая эффективность прогноза нефтегазоносности территории и контроля за разработкой месторождений достигается при комплексировании гидрогеохимических методов с газогеохимическими, геофизическими и традиционными геологическими методами. Однако гидрогеохимические методы позволяют и автономно решать большой спектр практических задач, связанных с поиском нефтегазовых месторождений, оптимизацией процессов извлечения нефти и газа, предотвращением возникновения неблагоприятных техногенных явлений при эксплуатации залежи.

Анализ имеющихся в литературе данных показал, что подземные воды, связанные с месторождениями нефти и газа, имеют специфический химический состав, который определяется целым рядом факторов – литолого-минералогическими особенностями водовмещающих горных пород, интенсивностью взаимодействия залежи с окружающими водами,

фазовым составом и химическими свойствами углеводородов и т.д. Наиболее характерными геохимическими признаками подземных вод, сопутствующих углеводородным залежам, являются высокая минерализация, Cl-Ca и НСО₂-Na типы вод (по классификации В.А. Сулина), низкая концентрация сульфатионов и повышенное содержание гидрокарбонат-ионов, аммония, йода, бора и брома. Развитие высокочувствительных методов химико-аналитических исследований способствует внедрению в геолого-промысловую практику, помимо традиционно используемых показателей нефтегазоносности, дополнительных гидрогеохимических данных. К ним относится прежде всего содержание стабильных изотопов, редких и рассеянных элементов в составе пластовых вод (включая РЗЭ). Кроме того, необходим пересмотр результатов, полученных устаревшими методами аналитической химии несколько десятилетий назад, что было показано нами на примере нефтегазоносных районов на севере о. Сахалин.

Исходя из анализа литературы, отдельно взятый гидрогеохимический показатель может зависеть от действия нескольких факторов, не все из которых обусловлены процессами генерации, миграции и аккумуляции углеводородов. В этой связи использование одного показателя может иметь низкую информативность или вовсе приводить к ложным выводам. Наибольшая эффективность гидрогеохимических исследований в нефтегазовой практике достигается при комплексном использовании различных показателей. При этом для каждого нефтегазоносного региона, вероятно, необходимо подбирать свой – наиболее информативный – комплекс (набор) гидрогеохимических показателей. Кроме того, рабочие диапазоны значений рассматриваемых гидрогеохимических индикаторов могут различаться в разных регионах, т.е. комплекс выбранных показателей должен калиброваться отдельно для каждой нефтегазоносной области.

Список литературы

1. Балашова Е.Ю., Фарносова Е.Н. **2017.** Анализ состава и перспективы переработки попутных нефтяных вод и пластовых вод. *Успехи в химии и химической технологии*, 31(5): 76–78.

2. Барташевич О.В., Зорькин Л.М., Зубарев С.Л., Карус Е.В., Лопатин Н.В., Могилевский Г.А., Петухов А.В., Стадник Е.В., Старобинец И.С., Строганов В.А., Ягодкин В.В. **1980.** *Геохимические методы поисков нефтяных и газовых месторождений*. М.: Недра, 300 с.

3. Боровиков И.С. **2008.** Состояние фонда месторождений нефти и газа территорий Дальневосточного региона. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, 3: 1–10.

4. Вассоевич Н.Б. **1986.** Избранные труды. Геохимия органического вещества и происхождение нефти. М.: Наука, 368 с. 5. Григель Н.М. **1959.** Характеристика и происхождение пластовых вод нефтеносных районов Северного Сахалина: прил. к отчету о НИР «Результаты химического анализа вод нефтеносных районов Северного Сахалина». Оха: Сах. отд-ние ВНИГРИ, т. 2, 77 с. Инв. № 1369ф (Фонды ИМГиГ ДВО РАН).

6. Жарков Р.В., Козлов Д.Н., Ершов В.В., Сырбу Н.С., Никитенко О.А., Устюгов Г.В. **2019.** Паромайские термальные источники острова Сахалин: современное состояние и перспективы использования. *Геосистемы переходных зон*, 3(4): 428–437. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.428-437

7. Зорькин Л.М. **2008.** Генезис газов подземной гидросферы (в связи с разработкой методов поиска и залежей углеводородов). *Геоинформатика*, 1: 45–53.

8. Зытнер Ю.И., Чибисова В.С. **2013.** Гидрогеологические критерии прогноза нефтегазоносности северных районов Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, 8(3): 1–19. https://doi.org/10.17353/2070-5379/35_2013

9. Карцев А.А. 1989. Воды нефтяных и газовых месторождений СССР. М.: Недра, 382 с.

10. Карцев А.А., Вагин С.Б., Шугрин В.П. 1992. Нефтегазовая геология. М.: Недра, 208 с.

11. Киреева Т.А., Всеволожский В.А. **2013.** Инверсионные гидрокарбонатно-натриевые воды как показатель нефтегазоносности глубоких частей геологического разреза. *Глубинная нефть*, 1(2): 234–245.

12. Кошелев А.В., Ли Г.С., Катаева М.А. **2014.** Оперативный гидрохимический контроль за обводнением пластовыми водами объектов разработки Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения. *Вести газовой науки*: науч.-техн. сб., 3(19): 106–115.

13. Красинцева В.В. 1968. Гидрогеохимия хлора и брома. М.: Наука, 196 с.

14. Ларичев В.В., Попков В.И., Попков И.В. **2020.** Гидрохимический облик пластовых вод месторождения Оймаша. *Геология, география и глобальная энергия*, 2(77): 51–59.

15. Лехов А.В., Киреева Т.А. **2019.** Кольматация пород-коллекторов при эксплуатации нефтяных месторождений в результате катионного обмена. *Вестник Московского университета. Серия 4, Геология*, 6: 59–67.

16. Муляк В.В., Порошин В.Д., Гаттенбергер Ю.П., Абукова Л.А., Леухина О.И. **2007.** Гидрохимические методы анализа и контроля разработки нефтяных и газовых месторождений. М.: ГЕОС, 245 с.

17. Новиков Д.А. **2017.** Гидрогеологические предпосылки нефтегазоносности западной части Енисей-Хатангского регионального прогиба. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(4): 881–901. https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0322

18. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. **2019.** Содержание редкоземельных элементов в подземных водах верхнеюрских отложений Верх-Тарского нефтяного месторождения (Западная Сибирь). *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*, 2(1): 141–148. https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-2-1-141-148

19. Порошин В.Д., Муляк В.В. 2004. Методы обработки и интерпретации гидрогеохимических данных при контроле разработки нефтяных месторождений. М.: Недра, 220 с.

20. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. **2019.** Шлейф нефтяных метаболитов в подземных водах: формирование, эволюция, токсичность. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, гео*криология, 1: 38–45. https://doi.org/10.31857/s0869-78092019138-45

21. Серебренникова О.В. **2008.** *Геохимические методы при поиске и разведке месторождений нефти и газа.* Ханты-Мансийск: РИЦ ЮГУ, 172 с.

22. Смирнова Т.С. **2012.** Микрокомпоненты пластовых вод как показатель оценки нефтегазоносности локальных структур Каспийского моря. *Геология, география и глобальная энергия*, 2(45): 212–221.

23. Тиссо Б., Вельте Д. 1981. Образование и распространение нефти и газа. М.: Мир, 501 с.

24. Ханин А.А. 1969. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение. М.: Недра, 368 с.

25. Харахинов В.В., Астафьев Д.А., Калита М.А., Корчагин О.А., Игнатова В.А., Наумова Л.А. **2015.** Возможности открытия новых месторождений углеводородов на шельфах Сахалина и Западной Камчатки. *Вести газовой науки*: науч.-техн. сб., 2(22): 21–35.

26. Цитенко Н.Д., Евстафьева В.И. **1959.** *Характеристика и происхождение пластовых вод нефте*носных районов Северного Сахалина: отчет о НИР. Оха: Сах. отд-ние ВНИГРИ, т. 1, 309 с. Инв. № 1369ф (Фонды ИМГиГ ДВО РАН).

27. Чахмачев В.А., Виноградова Т.Л. **2003.** Геохимические показатели фациально-генетических типов исходного органического вещества. *Геохимия*, 5: 554–560.

28. Akinlua A., Smith R.M. **2010.** Subcritical water extraction of trace metals from petroleum source rock. *Talanta*, 81(4–5): 1346–1349. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.02.029

29. Akstinat M. **2019.** Chemical and physicochemical properties of formation waters of the oil and gas industry. *J. of Hydrology*, 578: 124011, 14 p. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124011

30. Boschetti T., Toscani L., Shouakar-Stash O., Iacumin P., Venturelli G., Mucchino C., Frape S.K. **2011.** Salt Waters of the Northern Apennine Foredeep Basin (Italy): Origin and Evolution. *Aquatic Geochemistry*, 17: 71–108. https://doi/10.1007/s10498-010-9107-y

31. Boschetti T., Angulo B., Cabrera F., Vasquez J., Montero R.L. **2016.** Hydrogeochemical characterization of oilfield waters from southeast Maracaibo Basin (Venezuela): Diagenetic effects on chemical and isotopic composition. *Marine and Petroleum Geology*, 73: 228–248. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.02.020

32. Bowles M.W., Samarkin V.A., Bowles K.M., Joye S.B. **2011.** Weak coupling between sulfate reduction and the anaerobic oxidation of methane in methane-rich seafloor sediments during ex situ incubation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(2): 500–519. https://doi/10.1016/j.gca.2010.09.043

33. Chen K.-F., Kao C.-M., Chen C.-W., Surampalli R.Y., Lee M.-S. **2010.** Control of petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater by intrinsic and enhanced bioremediation. *J. of Environmental Sciences*, 22(6): 864–871.

34. Chongxi L., Xueming W. **1991.** Near surface hydrogeochemical exploration for oil and gas in China. *J. of Southeast Asian Earth Sciences*, 5(1–4): 313–316. https://doi.org/10.1016/0743-9547(91)90041-U

35. Engle M.A., Doolan C.A., Pitman J.A., Varonka M.S., Chenault J., Orem W.H., McMahon P.B., Jubb A.M. **2020.** Origin and geochemistry of formation waters from the lower Eagle Ford Group, Gulf Coast Basin, south central Texas. *Chemical Geology*, 550: 119754, 12 p. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119754

36. Grasby S.E., Chen Z., Dewing K. **2012.** Formation water geochemistry of the Sverdrup Basin: Implications for hydrocarbon development in the High Arctic. *Applied Geochemistry*, 27(8): 1623–1632. http://dx.doi. org/10.1016/j.apgeochem.2012.04.001

37. Guo Y., Wen Z., Zhang C., Jakada H. **2020.** Contamination and natural attenuation characteristics of petroleum hydrocarbons in a fractured karst aquifer, North China. *Environmental Science and Pollution Research*, 27: 22780–22794. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08723-2

38. Hoffmann A.A., Borrok D.M. **2020.** The geochemistry of produced waters from the Tuscaloosa Marine Shale, USA. *Applied Geochemistry*, 116: 104568, 10 p. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104568

39. Marić N., Štrbački J., Mrazovac Kurilić S., Beškoski V.P., Nikić Z., Ignjatović S., Malbašić J. **2019.** Hydrochemistry of groundwater contaminated by petroleum hydrocarbons: the impact of biodegradation (Vitanovac, Serbia). *Environmental Geochemistry and Health*, 42: 1921–193. https://doi.org/10.1007/s10653-019-00462-9

40. Martos-Villa R., Mata M.P., Williams L.B., Nieto F., Rey X.A., Sainz-Diaz C.I. **2020.** Evidence of hydrocarbon-rich fluid interaction with clays: Clay mineralogy and boron isotope data from Gulf of Cadiz Mud Volcano sediments. *Minerals*, 10(8): 1–25. https://doi.org/10.3390/min10080651

41. McMahon P.B., Kulongoski J.T., Vengosh A., Cozzarelli I.M., Landon M.K., Kharaka Y.K., Gillespie J.M., Davis T.A. **2018.** Regional patterns in the geochemistry of oil-field water, southern San Joaquin Valley, California, USA. *Applied Geochemistry*, 98: 127–140. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.09.015

42. Köster M.H., Williams L.B., Kudejova P., Gilg H.A. **2019.** The boron isotope geochemistry of smectites from sodium, magnesium and calcium bentonite deposits. *Chemical Geology*, 510(2): 166–187. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.12.035

43. Nye C.W., Quillinan S., Neupane G., McLing T. **2017.** Aqueous rare earth element patterns and concentration in thermal brines associated with oil and gas production. In: *Forty Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 13–15 February 2017, Stanford, California, USA. New York: Curran Assoc., Inc., 11 p.

44. Özdemir A. **2018.** Iodine-rich waters of Turkey and oil & gas potential of the onshore. J. of Sustainable Engineering Applications and Technological Developments, 1(2): 103–150.

45. Rachinsky M.Z., Kerimov V.Y. **2015.** *Fluid dynamics of oil and gas reservoirs*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons; Salem, Massachusetts: Scrivener Publ. LLC, 613 p. https://doi.org/10.1002/9781118999004

46. Serres-Piole C., Preud'homme H., Moradi-Tehrani N., Allanic C., Jullia H., Lobinski R. **2012.** Water tracers in oilfield applications: Guidelines. *J. of Petroleum Science and Engineering*, 98–99: 22–39. https://doi:10.1016/j.petrol.2012.08.009

47. Sun Z., Xie X. **2014.** Nationwide oil and gas geochemical exploration program in China. J. of Geochemical Exploration, 139: 201–206. http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.09.004

48. Williams L.B., Hervig R.L., Holloway J.R., Hutcheon I. **2001a.** Boron isotope geochemistry during diagenesis. Pt I. Experimental determination of fractionation during illitization of smectite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(11): 1769–1782. https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00557-9

49. Williams L.B., Hervig R.L., Wieser M.E., Hutcheon I. **2001b.** The influence of organic matter on the boron isotope geochemistry of the gulf coast sedimentary basin, USA. *Chemical Geology*, 174(4): 445–461. https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00289-8

50. Winniford W., Dunkle M.N. **2020.** Tracers for oil and gas reservoirs. In: *Analytical Techniques in the Oil and Gas Industry for Environmental Monitoring*. New York: John Wiley & Sons. 329–345.

51. Worden R.H. **1996.** Controls on halogen concentrations in sedimentary formation waters. *Mineralogical Magazine*, 60(399): 259–274. https://doi.org/10.1180/minmag.1996.060.399.02

52. Yu H., Wang Z., Rezaee R., Zhang Y., Nwidee L.N., Liu X., Verrall M., Stefan I. **2020.** Formation water geochemistry for carbonate reservoirs in Ordos basin, China: Implications for hydrocarbon preservation by machine learning. *J. of Petroleum Science and Engineering*, 185: 106673. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106673

References

1. Balashova E.Y., Farnosova E.N. **2017.** Analysis of the composition and prospects of processing of associated petroleum and stratal waters. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii = J. Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 31(5): 76–78. (In Russ.).

2. Bartashevich O.V., Zor'kin L.M., Zubarev S.L., Karus E.V., Lopatin N.V., Mogilevskiy G.A., Petukhov A.V., Stadnik E.V., Starobinets I.S., Stroganov V.A., Yagodkin V.V. **1980.** *Geokhimicheskie metody poiskov neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy* [*Geochemical methods of exploration for oil and gas fields*]. Moscow: Nedra, 300 p. (In Russ.).

3. Borovikov I.S. **2008.** Funds of oil and gas fields on the territory of the Far Eastern region. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika = Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*, 3: 1–10. (In Russ.).

4. Vassoevich N.B. **1986.** *Geokhimiya organicheskogo veshchestva i proiskhozhdenie nefti* [*Geochemistry of the organic matter and origin of petroleum*]: [Selected proceedings]. Moscow: Nauka, 368 p. (In Russ.).

5. Grigel' N.M. **1959.** *Kharakteristika i proiskhozhdenie plastovykh vod neftenosnykh rayonov Severnogo Sakhalina*: pril. k otchetu o NIR «Rezul'taty khimicheskogo analiza vod neftenosnykh rayonov Severnogo Sakhalina» [*Characteristic and origin of stratum waters of the oil-bearing areas of the Northern Sakhalin*: app. to the report on scientific research "The results of the chemical analysis of the waters of oil-bearing areas of the Northern Sakhalin"]. Okha: Sakh. otd-nie VNIGRI, vol. 2, 77 p. Inv. № 1369f (Fondy IMGiG DVO RAN). (In Russ.).

6. Zharkov R.V., Kozlov D.N., Ershov V.V., Syrbu N.S., Nikitenko O.A., Ustyugov G.V. **2019.** Paromay thermal springs of Sakhalin Island: modern state and prospects for use. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 3(4): 428–437. (In Russ.). doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.428-437

7. Zor'kin L.M. **2008.** Genesis gases of the underground hydrosphere in connection with prospecting of hydrocarbon accumulations. *Geoinformatika* = *Geoinformation*, 1: 45–53. (In Russ.).

8. Zytner Yu.I., Chibisova V.S. **2013.** Hydrogeological criteria for petroleum potential forecast (northern areas of Timan-Pechora province). *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika = Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*, 8(3): 1–19. (In Russ.). https://doi.org/10.17353/2070-5379/35_2013

9. Kartsev A.A. **1989.** Vody neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy SSSR [Waters of oil and gas fields of the USSR]. Moscow: Nedra, 382 p. (In Russ.).

10. Kartsev A.A., Vagin S.B., Shugrin V.P. **1992.** *Neftegazovaya geologiya* [*Petroleum geology*]. Moscow: Nedra, 208 p. (In Russ.).

11. Kireeva T.A., Vsevolozhsky V.A. **2013.** Contrails sodium bicarbonate-water oil and gas as an indicator of the deeper parts of the geological section. *Glubinnaya neft' = Deep Oil*, 1(2): 234–245. (In Russ.).

12. Koshelev A.V., Li G.S., Kataeva M.A. **2014.** Operativnyy gidrokhimicheskiy kontrol' za obvodneniem plastovymi vodami ob"ektov razrabotki Urengoyskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya [Operative hydrochemical control over the watering out of the formation waters of the development sites of the Urengoyskoye oil and gas condensate field]. *Vesti gazovoy nauki:* nauch.-tekhn. sbornik, 3(19): 106–115. (In Russ.).

13. Krasintseva V.V. 1968. [Hydrogeochemistry of chlorine and bromine]. Moscow: Nauka, 196 p. (In Russ.).

14. Larichev V.V., Popkov V.I., Popkov I.V. **2020.** Hydrochemical appearance of reservoir waters of the Oymasha field. *Geologiya, Geografiya i Globalnaya Energiya = Geology, Geography and Global Energy*, 2(77): 51–59. (In Russ.).

15. Lehov A.V., Kireeva T.A. **2020.** Colmatation of reservoir rocks in the operation of oil fields as a result of cation exchange. *Moscow University Geology Bull.*, 75(1): 58–66. https://doi.org/10.3103/s0145875220010081

16. Mulyak V.V., Poroshin V.D., Gattenberger Yu.P., Abukova L.A., Leukhina O.I. **2007.** [Hydrogeochemical methods for analysis and control of exploration for oil and gas fields]. Moscow: GEOS, 245 p. (In Russ.).

17. Novikov D.A. **2017.** Hydrogeological conditions for the presence of oil and gas in the western segment of the Yenisei-Khatanga regional trough. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 881–901. (In Russ.). https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0322

18. Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F. **2019.** Content of rare-earth elements in groundwaters of Upper Jurassic sediments of the Verkh-Tarsk oil field (Western Siberia). *Interexpo GEO-Siberia*, 2(1): 141–148. (In Russ.). https://doi.org/10.33764/2618-981x-2019-2-1-141-148

19. Poroshin V.D., Mulyak V.V. **2004.** *Metody obrabotki i interpretatsii gidrogeokhimicheskikh dannykh pri kontrole razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy* [*The methods for processing and interpreting the hydrogeochemical data by control of exploration for oil fields*]. Moscow: Nedra, 220 p. (In Russ.).

20. Putilina V.S., Galitskaya I.V., Yuganova T.I. **2019.** Plume of oil metabolites in groundwater: formation, evolution, and toxicity. *Environmental Geoscience*, 1: 38–45. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/s0869-78092019138-45

21. Serebrennikova O.V. **2008.** Geokhimicheskie metody pri poiske i razvedke mestorozhdeniy nefti i gaza [Geochemical methods in the search and exploration of oil and gas fields]. Khanty-Mansiysk: RITs YuGU, 172 p. (In Russ.).
22. Smirnova T.S. **2012.** Microcomponents of stratal water as an indicator for evaluating of local structures of a presence oil and gas the Caspian Sea. *Geologiya, Geografiya i Globalnaya Energiya = Geology, Geography and Global Energy*, 2(45): 212–221. (In Russ.).

23. Tisso B., Vel'te D. **1981.** *Obrazovanie i rasprostranenie nefti i gaza* [*Oil and gas formation and distribution*]. Moscow: Mir, 501 p. (In Russ.).

24. Khanin A.A. **1969.** *Porody-kollektory nefti i gaza i ikh izuchenie* [*Petroleum rock reservoirs and their study*]. Moscow: Nedra, 368 p. (In Russ.).

25. Kharakhinov V.V., Astaf'ev D.A., Kalita M.A., Korchagin O.A., Ignatova V.A., Naumova L.A. **2015.** [Possibilities of new petroleum fields discovery on the shelves of Sakhalin and Western Kamchatka]. *Vesti gazo-voy nauki*: nauch.-tekhn. sbornik, 2(22): 21–35. (In Russ.).

26. Tsitenko N.D., Evstaf'eva V.I. **1959.** *Kharakteristika i proiskhozhdenie plastovykh vod neftenosnykh ray*onov Severnogo Sakhalina [Characteristic and origin of stratum waters of the oil-bearing areas of the Northern Sakhalin]: otchet o NIR [report on scientific research]. Okha: Sakh. otd-nie VNIGRI, vol. 1, 309 p. Inv. № 1369f (Fondy IMGiG DVO RAN). (In Russ.).

27. Chakhmachev V.A., Vinogradova T.L. **2003.** Geochemical indicators of facies and genetic types of parent organic matter. *Geochemistry International*, 41(5): 497–502.

28. Akinlua A., Smith R.M. **2010.** Subcritical water extraction of trace metals from petroleum source rock. *Talanta*, 81(4–5): 1346–1349. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.02.029

29. Akstinat M. **2019.** Chemical and physicochemical properties of formation waters of the oil and gas industry. J. of Hydrology, 578: 124011, 14 p. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124011

30. Boschetti T., Toscani L., Shouakar-Stash O., Iacumin P., Venturelli G., Mucchino C., Frape S.K. **2011.** Salt Waters of the Northern Apennine Foredeep Basin (Italy): Origin and Evolution. *Aquatic Geochemistry*, 17: 71–108. https://doi/10.1007/s10498-010-9107-y

31. Boschetti T., Angulo B., Cabrera F., Vasquez J., Montero R.L. **2016.** Hydrogeochemical characterization of oilfield waters from southeast Maracaibo Basin (Venezuela): Diagenetic effects on chemical and isotopic composition. *Marine and Petroleum Geology*, 73: 228–248. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.02.020

32. Bowles M.W., Samarkin V.A., Bowles K.M., Joye S.B. **2011.** Weak coupling between sulfate reduction and the anaerobic oxidation of methane in methane-rich seafloor sediments during ex situ incubation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(2): 500–519. https://doi/10.1016/j.gca.2010.09.043

33. Chen K.-F., Kao C.-M., Chen C.-W., Surampalli R.Y., Lee M.-S. **2010.** Control of petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater by intrinsic and enhanced bioremediation. *J. of Environmental Sciences*, 22(6): 864–871.

34. Chongxi L., Xueming W. **1991.** Near surface hydrogeochemical exploration for oil and gas in China. *J. of Southeast Asian Earth Sciences*, 5(1–4): 313–316. https://doi.org/10.1016/0743-9547(91)90041-U

35. Engle M.A., Doolan C.A., Pitman J.A., Varonka M.S., Chenault J., Orem W.H., McMahon P.B., Jubb A.M. **2020.** Origin and geochemistry of formation waters from the lower Eagle Ford Group, Gulf Coast Basin, south central Texas. *Chemical Geology*, 550: 119754, 12 p. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119754

36. Grasby S.E., Chen Z., Dewing K. **2012.** Formation water geochemistry of the Sverdrup Basin: Implications for hydrocarbon development in the High Arctic. *Applied Geochemistry*, 27(8): 1623–1632. http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.04.001

37. Guo Y., Wen Z., Zhang C., Jakada H. **2020.** Contamination and natural attenuation characteristics of petroleum hydrocarbons in a fractured karst aquifer, North China. *Environmental Science and Pollution Research*, 27: 22780–22794. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08723-2

38. Hoffmann A.A., Borrok D.M. **2020.** The geochemistry of produced waters from the Tuscaloosa Marine Shale, USA. *Applied Geochemistry*, 116: 104568, 10 p. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104568

39. Marić N., Štrbački J., Mrazovac Kurilić S., Beškoski V.P., Nikić Z., Ignjatović S., Malbašić J. **2019.** Hydrochemistry of groundwater contaminated by petroleum hydrocarbons: the impact of biodegradation (Vitanovac, Serbia). *Environmental Geochemistry and Health*, 42: 1921–193. https://doi.org/10.1007/s10653-019-00462-9

40. Martos-Villa R., Mata M.P., Williams L.B., Nieto F., Rey X.A., Sainz-Diaz C.I. **2020.** Evidence of hydrocarbon-rich fluid interaction with clays: Clay mineralogy and boron isotope data from Gulf of Cadiz Mud Volcano sediments. *Minerals*, 10(8): 1–25. https://doi.org/10.3390/min10080651

41. McMahon P.B., Kulongoski J.T., Vengosh A., Cozzarelli I.M., Landon M.K., Kharaka Y.K., Gillespie J.M., Davis T.A. **2018.** Regional patterns in the geochemistry of oil-field water, southern San Joaquin Valley, California, USA. *Applied Geochemistry*, 98: 127–140. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.09.015

42. Köster M.H., Williams L.B., Kudejova P., Gilg H.A. **2019.** The boron isotope geochemistry of smectites from sodium, magnesium and calcium bentonite deposits. *Chemical Geology*, 510(2): 166–187. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.12.035 43. Nye C.W., Quillinan S., Neupane G., McLing T. **2017.** Aqueous rare earth element patterns and concentration in thermal brines associated with oil and gas production. In: *Forty Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 13–15 February 2017, Stanford, California, USA. New York: Curran Assoc., Inc., 11 p.

44. Özdemir A. **2018.** Iodine-rich waters of Turkey and oil & gas potential of the onshore. *J. of Sustainable Engineering Applications and Technological Developments*, 1(2): 103–150.

45. Rachinsky M.Z., Kerimov V.Y. **2015.** *Fluid dynamics of oil and gas reservoirs*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons; Salem, Massachusetts: Scrivener Publ. LLC, 613 p. https://doi.org/10.1002/9781118999004

46. Serres-Piole C., Preud'homme H., Moradi-Tehrani N., Allanic C., Jullia H., Lobinski R. **2012.** Water tracers in oilfield applications: Guidelines. *J. of Petroleum Science and Engineering*, 98–99: 22–39. https://doi:10.1016/j.petrol.2012.08.009

47. Sun Z., Xie X. **2014.** Nationwide oil and gas geochemical exploration program in China. J. of Geochemical Exploration, 139: 201–206. http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.09.004

48. Williams L.B., Hervig R.L., Holloway J.R., Hutcheon I. **2001a.** Boron isotope geochemistry during diagenesis. Pt I. Experimental determination of fractionation during illitization of smectite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(11): 1769–1782. https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00557-9

49. Williams L.B., Hervig R.L., Wieser M.E., Hutcheon I. **2001b.** The influence of organic matter on the boron isotope geochemistry of the gulf coast sedimentary basin, USA. *Chemical Geology*, 174(4): 445–461. https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00289-8

50. Winniford W., Dunkle M.N. **2020.** Tracers for oil and gas reservoirs. In: *Analytical Techniques in the Oil and Gas Industry for Environmental Monitoring*. New York: John Wiley & Sons. 329–345.

51. Worden R.H. **1996.** Controls on halogen concentrations in sedimentary formation waters. *Mineralogical Magazine*, 60(399): 259–274. https://doi.org/10.1180/minmag.1996.060.399.02

52. Yu H., Wang Z., Rezaee R., Zhang Y., Nwidee L.N., Liu X., Verrall M., Stefan I. **2020.** Formation water geochemistry for carbonate reservoirs in Ordos basin, China: Implications for hydrocarbon preservation by machine learning. *J. of Petroleum Science and Engineering*, 185: 106673. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106673

Об авторах

НИКИТЕНКО Ольга Александровна (https://orcid. org/0000-0002-0177-2147), научный сотрудник отдела исследования вещественного состава геосфер ЦКП, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, nikitenko.olga@list.ru

ЕРШОВ Валерий Валерьевич (https://orcid.org/0000-0003-2289-6103), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела исследования вещественного состава геосфер ЦКП, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, valery ershov@mail.ru

About Authors

NIKITENKO Olga A. (https://orcid.org/0000-0002-0177-2147), Researcher, Department for the study of material composition of the geospheres of Centre for the Collective Use, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk,

nikitenko.olga@list.ru

ERSHOV Valery V. (https://orcid.org/0000-0003-2289-6103), Cand. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher, Department for the study of material composition of the geospheres of Centre for the Collective Use, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, valery ershov@mail.ru Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.481

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.378-388

Механизмы перехвата пластиковых микрочастиц буферными зонами из макрофитов

© 2021 В. Д. Казмирук

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия *E-mail: kazm@iwp.ru

Резюме. Загрязнение окружающей среды стойкими к деградации микрочастицами синтетических полимерных материалов (микропластиком) в наши дни становится одной из нарастающих глобальных проблем. Вместе с тем исследования о поведении пластиковых микрочастиц в окружающей среде находятся лишь в начальной стадии, как и разработка методов предотвращения и регулирования загрязнения водных объектов микропластиком. Автором впервые в мировой научной практике для этих целей было предложено использовать барьерную роль макрофитов. На основе натурных и лабораторных экспериментов с пластиковыми микрочастицами с различной полимерной матрицей (полиэтилен, полистирол, полиэтилентерефталат, полиэстер) и воздушно-водной и погруженной растительностью, а также растениями с плавающими на поверхности воды листьями установлен ряд механизмов, прямо и опосредованно ведущих к задержанию микропластика макрофитами. По преобладанию того или иного физического процесса эти механизмы можно объединить в четыре группы: 1) появление дополнительных сопротивлений перемещению водных и воздушных масс. Изменение кинематической структуры потоков воды и воздуха способствует замедлению движения микрочастиц, их осаждению и задержанию растениями; 2) гашение кинетической энергии ветровых волн и дождевых капель зарослями макрофитов предотвращает повторное перемещение уже задержанных микрочастиц; 3) механическое задержание пластиковых микрочастиц происходит в результате существования неровностей в структуре растений, ситоподобных структур из переплетений стеблей и листьев, объемной массы растительного опада, адгезии поверхностей растений и микрочастиц, что усиливается липкими поверхностями перифитона; 4) притягивание и прилипание пластиковых микрочастиц к растениям и друг к другу происходит в результате взаимодействия электрических полей.

Ключевые слова: микропластик, макрофиты, загрязнение, водный объект, задержание микрочастиц

Mechanisms of plastic microparticles retention by buffer zones with macrophytes

Vasily D. Kazmiruk

Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia *E-mail: kazm@iwp.ru

Abstract. Environmental pollution by resistant to degradation microparticles of synthetic polymer materials (microplastics) is one of the growing global problems nowadays. At the same time, research on the behavior of plastic microparticles in the environment is only at an early stage, as well as the development of methods for preventing and regulating microplastic contamination of water bodies. For the first time in world scientific practice, the author proposed to use the barrier role of macrophytes for these purposes. A number of mechanisms directly and indirectly leading to the microplastic retention by macrophytes have been identified based on field and laboratory experiments with plastic microparticles with different polymer matrix (polyethylene, polystyrene, polyethylene terephthalate, polyester) and air-water and immersed vegetation, as well as plants with leaves floating on the water surface. According to the predominance of a particular physical process, these mechanisms can be combined into four groups: (1) The appearance of additional resistance to the movement of water and air masses. Change in the kinematic structure of water and air flows promotes slowing down the movement of microparticles, their sedimentation and retention by plants; (2) Decreasing the kinetic energy of wind waves and raindrops by thickets of macrophytes prevents repeated movement of already trapped microparticles; (3) Mechanical retention of plastic microparticles occurs as a result of the existence of irregularities in the structure of plants, sieve-like structures made of interweaving of stems and leaves, the bulk of plant litter, adhesion of plant

surfaces and microparticles, which is enhanced by the sticky surfaces of the periphyton; (4) The attraction and adhesion of plastic microparticles to plants and to each other occurs as a result of the interaction of electric fields.

Keywords: microplastics, macrophytes, contamination, water body, microparticle retention

Для цитирования: Казмирук В.Д. Механизмы перехвата пластиковых микрочастиц буферными зонами из макрофитов. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 4, с. 378–388.

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.378-388

Благодарности и финансирование

Работа выполнена в рамках темы № 0147-2019-0002 (№ государственной регистрации АААА-А18-118022090104-8) государственного задания ИВП РАН.

Автор признателен анонимным рецензентам за внимательное прочтение статьи, замечания и предложения.

Введение

Обширное применение пластмассовых изделий, многие из которых имеют короткий период эксплуатации или разовое использование, длительный период естественной деградации синтетических полимеров, серьезные трудности и дороговизна вторичной переработки пластмасс стали причинами огромного количества бытового и промышленного пластикового мусора. Даже в первичном виде этот мусор сам по себе является опасным для окружающей среды, а при разрушении его опасность возрастает во много раз. Мелкие частицы синтетических полимерных материалов получили обобщающее название – микропластик. Он обнаружен уже во всех природных средах - почвах, воде, воздухе, живых организмах. Имея малые размеры, высокие сорбционные свойства и мобильность, эти частицы способны переносить высокотоксичные загрязнители и проникать в живые организмы, оказывая как мгновенное, так и долговременное негативное влияние на всех уровнях, от генетического до популяционного [Bai et al., 2021; Kukkola et al., 2021; Sendra et al., 2021].

Высшие водные растения (ВВР), пресноводные и морские, самостоятельно или в качестве составной части прибрежных ветлендов, способны эффективно перехватывать, накапливать и депонировать как природные органические и минеральные, так и антропогенные микрочастицы, включая микропластик, поступающие с суши в водные объекты или находящиеся в них, но в результате водообмена оказавшиеся в зарастающей зоне. Так, еще в 1980-е годы было показано, что только ежеголовник прямой *Sparganium erectum* L. (*S. ramosum* Huds.), который занимает около 10 % территории в отмелой зоне устьевого взморья Волги, *For citation*: Kazmiruk V.D. Mechanisms of plastic microparticles retention by buffer zones with macrophytes. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 378–388. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.378-388

Acknowledgements and Funding

The study was carried out within the framework of the state assignment of the IWP RAS No. AAAA-A18-118022090104-8.

The Author is grateful to the anonymous Reviewers for the careful reading of the paper, comments and suggestions.

способен удержать до 10 % годового твердого стока реки, т.е. 0.64 млн т [Казмирук и др., 2004]. Позже сходные результаты были получены в результате натурных экспериментов для частиц органического вещества (бумаги), которой моделировались фрагменты листьев дуба. Была получена эффективность задержания микрочастиц 26–100 % [Horvath, 2004].

Недавние исследования показали, что макрофиты и в целом зарастающие зоны могут задерживать значительное количество пластиковых микрочастиц. Натурные и лабораторные эксперименты, проведенные автором с 14 видами ВВР, показали, что степень задержания микрочастиц на основе полиэтилена высокой плотности (микропленки и микрофрагменты) в размерном диапазоне 1-5 мм составляет 22-100 % [Казмирук, 2021]. Имеются данные о нахождении пластиковых микрочастиц на 75 % отобранных растений талассии черепаховой (Thalassia testudinum Banks & Sol. ex K.D. Koenig) у побережья атолла Тернефф (Белиз) [Goss et al., 2018] и на 94 % растений взморника (Zostera marina L.) в Шотландии [Jones et al., 2020]. Для последнего вида в лабораторных условиях было получено, что при скоростях движения воды менее 12 см/с 40-90 % микрогранул из полипропилена, полиэтилентерефталата, полистирола и полиамида или не движутся, или задерживаются растениями [Santos et al., 2021]. Сопоставимые данные получены для зарастающих зон Балтийского моря. Придонная вода в этих зонах содержит на два порядка больше (92.5 %) пластиковых микрочастиц размером 0.2–5 мм, в основном микроволокна, чем зоны, где растительность отсутствует (1-1.1 шт./л) [Esiukova et al., 2021]. На важность растительности соленых маршей в трансформации стока пластиковых микрочастиц, поступающих с суши в море, указывается также в работе [Stead et al., 2020] на основе полевых исследований в приливном эстуарии Саутгемптон-Вотер (Великобритания).

Хотя исследования взаимодействия пластиковых микрочастиц и макрофитов, а также их поведения в зарастающих зонах находятся только в начальной стадии, важно понять возможные механизмы этого взаимодействия. О том, что таких механизмов может быть несколько и что макрофиты могут играть существенную роль в поведении и конечной судьбе пластиковых микрочастиц, говорится и в недавно опубликованной работе [Kalčíková, 2020].

Целью данной работы является рассмотрение причин и механизмов, в результате которых пластиковые микрочастицы, попавшие в водный объект и перемещающиеся на поверхности воды, в ее толще или находящиеся на дне (в придонной области), оказываются задержанными в зарослях макрофитов. На основе натурных и лабораторных экспериментов с пластиковыми микрочастицами с различной полимерной матрицей (полиэтилен, полистирол, полиэтилентерефталат, полиэстер) и воздушно-водной и погруженной растительностью, а также растениями с плавающими на поверхности воды листьями было установлено 12 механизмов, прямо и опосредованно ведущих к задержанию микропластика макрофитами.

Материал и методы исследования

Изучалось поведение пластиковых микрочастиц в апреле-сентябре 2020 г. во время натурных экспериментов в прибрежной зоне Иваньковского водохранилища, его притоков и малых водоемах Тверской области (рис. 1), а также в лабораторных условиях. Характеристики исследуемых частиц приведены в табл. 1. В экспериментах использовались растущие (на разных стадиях развития) и отмершие растения при их различном расположении. Густота произрастания также варьировала. В натурных экспериментах определенное количество пластиковых микрочастиц различной формы, состава и размера помещали в прибрежной зоне на расстоянии 1 м от уреза воды с целью их естественного смыва во время дождей или сдува ветром в водный объект на участках шириной 1 м с прибрежной растительностью и без нее. На участках измерялись глубина и скорость течения воды, высота, длина и частота ветровых и судовых волн, уклон дна и тип донных отложений, количество растений на 1 м² акватории, диаметр растений, определялось проективное покрытие ВВР, ежедневно фиксировалась скорость и направление ветра, наличие или отсутствие дождя. Подсчитывалось количество частиц микропластика, находящихся на каждом метре от уреза воды, и их положение: плавают на поверхности воды, опустились на дно или прикрепились к растениям. Периодичность измерений зависела от особенностей участка и погодных условий и колебалась от ежедневных до одного раза в неделю. В естественных условиях опыты проводились при высоте волн в прибрежной зоне 3.5-6.5 см, их длине 1.5-4.2 м и частоте 0.25 - 0.50 1/c.

Автором проводились эксперименты для 14 видов ВВР: воздушно-водной, погруженной и с плавающими по поверхности воды листьями при проективном покрытии растений 50-100 % как мере их густоты. Концентрация микрочастиц на единице экспериментального участка составляла 50, 500, 1000, 3000 и 6000 шт./м². Концентрация частиц 500 шт./м² была принята как основная и наиболее вероятная, поскольку является верхним пределом обнаруживаемого в настоящее время уровня загрязнения микропластиком наиболее загрязненных континентальных водных объектов (например, водохранилище Данцзянкоу (Китай) [Di et al., 2019]) и соизмерима с концентрациями, используемыми в лабораторных исследованиях, при которых наблюдается негативное



Рис. 1. Задержание микрочастиц пенополистирола манником большим *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb.

Fig. 1. Retention of expanded polystyrene microparticles by *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb.

Базовый полимер	Вид, форма частиц	Средний размер, мм	Плотность, г/см ³	Средняя масса, мг
Полиэтилен высокой плотности	Микропленки в форме полосок и квадратов, фрагменты нерегулярной формы	1.0; 2.0; 4.5	0.89–0.97	1.1
Пенополистирол	Микросферы	1.0; 3.0; 4.5	0.01 - 0.04	0.4
Полиэтилентерефталат	Хлопья нерегулярной формы	4.3	0.96–1.45	1.8
Полиэстер	Микронити, микроволокна	2.5	1.24–2.30	0.3

Таблица 1. Характеристики исследованных пластиковых микрочастиц Table 1. The characteristics of microplastic particles used in this study

воздействие микропластика на биологические объекты [Казмирук, 2020]. Пластиковые частицы, которые прикреплялись к растениям, считались задержанными, а общий уровень задержания микрочастиц определяли как отношение прикрепленных к растениям частиц к их общему количеству, выраженное в процентах.

Лабораторные опыты выполнялись в сосудах объемом 5 л, в которые помещалось фиксированное количество пластиковых микрочастиц и срезанные на водоеме растения или их фрагменты. Отдельным вопросом было исключение или минимизация влияния стенок, так как пластиковые микрочастицы имеют хорошую способность прилипать к стенкам стеклянных сосудов или даже ползти по ним вертикально вверх. Это особенно характерно для частиц полистирола, плотность которого немного выше плотности воды и частицы которого, в зависимости от концентрации и размера, могут не полностью рассеиваться в воде [Eitzen et al., 2019], а также легких частиц пенополистирола. Способность частиц пенополистирола подниматься по стенкам стеклянных сосудов (даже сухим) делает крайне затруднительным проведение лабораторных экспериментов. Для минимизации влияния стенок лабораторных сосудов на результаты экспериментов использовались широкие сосуды диаметром не менее 40 см, растения располагались на расстоянии не ближе 5 см от стенок, а прикрепившиеся к стенкам в результате опытов микрочастицы исключались из общего подсчета и дальнейшего рассмотрения.

Были выполнены серии опытов с микрочастицами различного размера, формы и состава, с однородными характеристиками или в смеси. Состояние растений варьировало от живых, в различной стадии роста, до частично разложившихся, включая искусственно высушенные и отмершие. Помимо естественно спокойного состояния водной среды искусственно создавались перемешивание воды и волновые движения. Ежечасно подсчитывалось количество пластиковых микрочастиц, прилипших и задержанных стеблями, ветвями и листьями растений. В натурных и лабораторных условиях каждый эксперимент повторялся 5–14 раз.

Результаты и обсуждение

Характерной особенностью пластиковых микрочастиц, определяющих их поведение в окружающей среде, является плотность. Среди всех встречающихся в водных объектах микрочастиц только микропластик способен и плавать на поверхности воды, и находиться в ее толще, концентрируясь на разных глубинах, и залегать на дне, смешиваясь с другими минеральными, органическими и антропогенными частицами, и перемещаться в вертикальной плоскости, то опускаясь на дно, то всплывая на поверхность воды. Такое поведение связано, прежде всего, с плотностью полимерных материалов, близкой к плотности воды, в результате чего пороговые значения характеристик плавучести под действием множественных гидроэкологических процессов могут быть легко преодолены в ту или другую сторону. Эти закономерности принципиально отличаются от закономерностей динамики взвешенных минеральных частиц такого же размера, которые в стационарных условиях концентрируются у дна.

Плотность частиц влияет на скорость их осаждения в водной среде. Реальные осаждающиеся частицы микропластика представляют собой полидисперсную взвесь с большим диапазоном размеров и форм. Кроме того, скорость осаждения частиц зависит от скорости перемещения водных масс, что определяется сложным комплексом внешних условий. Макрофиты, занимающие определенную часть водной толщи или всю водную толщу, создают особые условия движения воды в этой области и ее окрестностях. Такие характеристики растительности, как форма, гибкость и высота, оказывают существенное влияние на структуры потока. Растительность создает дополнительные гидравлические сопротивления, чем усиливает гашение кинетической энергии потока, способствует снижению скоростей движения воды и ее транспортирующей способности, уменьшению интенсивности турбулентного перемешивания, трансформации и затуханию ветровых волн. Водообмен на зарастающих участках уменьшается на 1–2 порядка. Коэффициенты гидравлической шероховатости таких участков в 4–6 раз выше, чем на незаросших акваториях [Казмирук, 1990].

Снижение водообмена и в целом гидродинамической активности водных масс происходит также за счет снижения скорости ветра у поверхности воды на участках, заросших жесткой воздушно-водной растительностью. На таких участках скорость ветра уменьшается в 6-10 раз по сравнению с аналогичными открытыми участками. Развитию турбулентного перемешивания от ветрового воздействия препятствует и погруженная растительность, верхушки которой находятся над водой, а также растения с плавающими по поверхности воды листьями. Существует тесная обратная связь между волновыми гидродинамическими характеристиками в прибрежной зоне водных объектов и структурой ценозов ВВР. Интенсивное гашение жесткой воздушно-водной растительностью энергии набегающих волн, как ветровых, так и приливных, отмечается во многих работах [Chen et al., 2007; Luther, Leonard, 1995; Quartet et al., 2007]. Таким образом, опосредованно, через снижение уровня гидродинамической активности водных масс, заросли всех групп макрофитов задерживают пластиковые микрочастицы через их осаждение в зарастающих зонах, а также препятствуют повторному взмучиванию частиц, находящихся на дне.

Поток, обтекающий растения, имеет сложную кинематическую структуру. На режим обтекания влияет гибкость растений. По-разному происходит обтекание погруженной и воздушно-водной растительности. Перед растениями возникает подпор водной поверхности, который может иметь как общий, так и локальный характер. В тыльной части растений по отношению к набегающему потоку формируются водоворотные зоны, где накапливаются захваченные микрочастицы. Такие же зоны образуются за группой растений, произрастающих отдельно. Ширина этих зон примерно равна ширине препятствия (растения или их группы), а длина примерно в 10–12 раз больше ширины. Результирующая скорость в зоне завихрения значительно меньше фоновых скоростей и может быть направлена против общего течения воды. В зоне завихрения происходит интенсивное осаждение всех взвешенных частиц, включая микропластик. Кроме того, на несколько порядков увеличивается время нахождения пластиковых микрочастиц непосредственно у поверхности растений, что увеличивает вероятность адгезии поверхностей микропластика и растений, а также агрегации микрочастиц.

Полог из воздушно-водных растений, а также растения с плавающими по поверхности воды листьями способствуют гашению кинетической энергии дождевых капель и снижают вероятность их прямого воздействия на плавающие и уже задержанные микрочастицы. Растения погруженных видов, видов с плавающими на поверхности воды листьями и свободноплавающие задерживают тяжелые частицы (например, частицы полиэтилентерефталата) на своей поверхности или поддерживают их на поверхности воды, не давая им погрузиться в воду и опуститься на дно. Ту же самую функцию выполняет фитопланктон, особенно когда из него формируются поверхностные пленки. Кроме того, все эти группы растений, находясь на поверхности воды, своим присутствием «армируют» поверхностную микропленку воды, не давая ей разрушиться при взаимодействии воздушных масс и поверхности воды.

Среди механизмов влияния на поведение и задержание пластиковых микрочастиц первостепенное значение имеют морфологические особенности макрофитов и густота их произрастания. Густоту растительности можно описать несколькими параметрами: объем растений в 1 м³ воды, количество растений на единицу площади, расстояние между растениями, проективное покрытие. Между всеми этими параметрами существует связь. В табл. 2 приведены характерные значения показателей густоты для некоторых видов ВВР в условиях средней полосы России. В общем случае связи между показателями густоты ВВР являются нелинейными, так как при сгущении зарослей происходит перекрывание верхних частей отдельных растений. Именно перекрывание и переплетение листьев и стеблей растений формирует сетеподобную структуру зарослей, где задерживаются пластиковые микрочастицы. Это особенно выражено у воздушно-водных растений. При сплошных зарослях с проективным покрытием около 100 % количество растений на единице площади и диаметр их стеблей могут существенно различаться (рис. 2).

Таблица 2. Связь между проективным покрытием и количеством растений на единице площади для некоторых видов BBP Table 2. The relationship between the projective cover and the number of plants per unit area for some species of higher aquatic plants

Вид ВВР	Проективное покрытие, %	Количество растений, шт./м ²
Манник большой Glyceria maxima (Hartm.) Holmb.	20	18
	80	28-36
Осока острая <i>Carex acuta</i> L.	100	625
Рдест плавающий Potamogeton natans L.	70	35
Кувшинка чисто-белая Nymphaea candida C. Presl.	15	11
Кубышка желтая Nuphar lutea (L.) Smith.	50	18
	90	36–38

В зависимости от особенностей морфологии различных видов ВВР, их пространственной структуры, наличия или отсутствия неровностей на стеблях и листьях степень задержания пластиковых микрочастиц, даже при одинаковой густоте зарослей, может существенно различаться. Неудивительно, что больше всего плавающих микрочастиц задерживают растения с плавающими по поверхности воды листьями, хотя и здесь есть различия. Так, чилим (Trapa natans L.) задерживает пластиковых микропленок на 16-18 %* меньше, чем другие виды с аналогичной морфологией (кувшинка чисто-белая и кубышка желтая) при том же проективном покрытии. Несколько меньшая степень задержания чилимом микрочастиц объясняется строением плавающей на поверхности воды розетки, имеющей не сплошную структуру, как листья кувшинки и кубышки, а представляющей собой вздутые черенки, на которых располагаются ромбовидные листья



Рис. 2. Связь между количеством растений на 1 м^2 и проективным покрытием зарослей тростника обыкновенного *Phragmites communis* Trin.

Fig. 2. The relationship between the number of plants per square meter and the projective cover of common reed (*Phragmites communis* Trin.) thickets.

длиной 2–3 см. При этом диаметр розетки и, соответственно, промежутки между листьями (пространство свободной поверхности воды) могут быть существенно больше, чем сплошные плавающие листья кувшинки и кубышки.

Различия в степени задержания пластиковых микрочастиц, связанные с морфологией макрофитов, наблюдаются и у погруженных видов. Например, роголистник темно-зеленый (Ceratophyllum demersum L.) задерживает на 32-54 % больше полиэтиленовых микропленок, чем рдесты (Potamogeton spp.), при проективном покрытии 50 % и на 12-32 % - при проективном покрытии 100 %. Объясняется это тем, что растения рдеста и его листья практически никогда не переплетаются, чего нельзя сказать о роголистнике, листья которого дихотомически разветвлены и образуют плотную сетчатую структуру. Кроме того, роголистник обычно произрастает в слабопроточных застойных зонах, слабый водообмен в которых также способствует задержанию пластиковых микрочастиц. Близки по морфологии и условиям произрастания к роголистнику элодея канадская (Elodea canadensis Michx.) и наяда малая (Najas *minor* All.). Растения же рдеста пронзеннолистного (Potamogeton perfoliatus L.) могут выдерживать значительные механические нагрузки, этот вид встречается на участках существенного воздействия ветровых и судовых волн.

Многие виды воздушно-водной растительности имеют массивные стебли и листья и сходную морфологию. Значительная часть микрочастиц, природных и искусственных, у этих растений задерживается в местах влагалищнопластиночного сочленения и узлах отхода листьев от стеблей. Не наблюдается выраженной

^{*}Относительная величина задержания микрочастиц тем или иным видом BBP определялась как разница между средней величиной задержания микрочастиц данным видом и аналогичной величиной для сравниваемого вида (группы видов), отнесенная к первой величине и выраженная в процентах.

связи между степенью шероховатости листьев и количеством микрочастиц, прикрепленных к растениям, поскольку у большинства видов листья гладкие или слабо шероховатые (тростник обыкновенный, манник большой). Вместе с тем осока острая, имеющая сильно шероховатые листья, при всех исследованных проективных покрытиях, как правило, демонстрирует примерно на 20 % бо́льшую эффективность задержания пластиковых микрочастиц. Для всех видов BBP адгезия к листьям и стеблям чаще всего проявляется у микрочастиц из гибкого материала: микроволокон и микропленок. Изменение адгезивных свойств поверхностей макрофитов может произойти в результате развития фитоперифитонных водорослей, формирующих на ВВР биопленку с липкой поверхностью.

Для пластиковых микрочастиц из материалов типа пенополистирола и в меньшей мере материалов на основе полиэтилена характерно притягивание их к другим предметам в результате взаимодействия электрических полей. В лабораторных условиях автором было установлено, что расстояние, на котором начинает проявляться действие сил притяжения микрофрагментов к стеблям и листьям ВВР, зависит от внутренней структуры стеблей растений и размера частиц. При трубчатой и сильно пористой структуре стеблей силы притяжения проявляются слабее и действуют на более близком расстоянии. Уменьшение размеров частиц также приводит к уменьшению расстояния взаимодействия, при этом не всегда пропорционально по отношению к тем же видам растений. Так, уменьшение размера экспериментальных частиц пенополистирола с 3 до 1 мм привело к снижению уровня притяжения частиц растениями аира обыкновенного (Acorus calamus L.) до уровня тростника, хотя для более крупных частиц он находился на уровне манника и осоки. Диаметр стебля для растений одного и того же вида не оказывает существенного влияния на расстояние притягивания частиц растениями. При уменьшении диаметра стебля тростника с 8 до 4 мм расстояние начала притягивания уменьшилось с 1.5 до 1.4 см, т.е. всего на 1 мм.

Для широко распространенных видов воздушно-водной растительности расстояние, на котором начинается притягивание частиц пенополистирола, в исследованном размерном диапазоне колеблется в пределах 1.0–1.9 см. Сильнее всего частицы пенополистирола притягивает осока, листья которой имеют ширину около 4 мм. Характерно, что в исследовании, проведенном нами ранее, именно осока была тем растением, которое удерживало наибольшее количество микрочастиц минерального и органического происхождения в расчете на единицу его воздушно-сухого веса (при абсолютно-сухом весе 2.5 г растение может сорбировать до 2.7 г мелкодисперсных твердых частиц) [Казмирук и др., 2004].

На расстояние, при котором начинается притягивание частиц пенополистирола, повидимому, влияет внутреннее анатомическое строение стеблей. Более низкая степень притягивания микрочастиц растениями рогоза узколистного (*Typha angustifolia* L.) и тростника обыкновенного может быть объяснена наличием у этих видов больших воздухоносных полостей (аэренхимы), которые у других исследованных видов значительно меньше.

При высокой концентрации пластиковых микрочастиц на поверхности воды в пределах зарослей ВВР порядка 1000 и более штук на 1 м² возможна агрегация свободноплавающих частиц с уже прикрепленными к растениям. Так, в наших экспериментах с растениями тростника при различных концентрациях микропленок со средним размером 4.5 мм и концентрации микрочастиц 6000 шт./м² происходило их слипание, запруживание узких мест между растениями, возникали цепочки прикрепившихся друг к другу микропленок. Это, в свою очередь, увеличивало степень задержания микрочастиц растениями, а график изменения степени задержания частиц тростником в зависимости от их концентрации приобретал S-образную форму (рис. 3). Такое явление наблюдалось при обоих исследованных проективных покрытиях ВВР. Степень задержания микропленок тростником при самой высокой из исследованных концентраций микрочастиц составляла 41 и 57 % при проективном покрытии 50 и 100 % соответственно.

Роль и интенсивность действия определенных механизмов в каждом конкретном случае зависит от видового состава BBP, густоты произрастания, сезона года, условий развития, гидрологических и гидродинамических особенностей водного объекта, размеров и происхождения частиц. Плавающие на поверхности воды частицы в основном задерживаются надводными частями воздушно-водных растений, верхушками некоторых видов погруженных растений, доходящих до поверхности воды (например, роголистника темно-зеленого), или плавающими на поверхности воды листьями и стеблями. Свободноплавающие растения, такие как сальвиния плавающая (Salvinia natans (L.) All.), пузырчатка обыкновенная (Utricularia vulgaris L.) или ряска трехдольная (Lemna trisulca L.), а также плавающий растительный опад из фрагментов отмершей ВВР и листовой опад из деревьев и кустарников могут создавать на поверхности воды плотные запруды, улавливающие практически все плавающие частицы. Жесткой основой таких запруд являются заросли воздушно-водной растительности. Подобные запруды часто формируются на устьевых участках малых водотоков, впадающих в водоемы, чему способствует общее снижение скоростей движения воды, а также в зарослях прибрежной воздушно-водной растительности под действием нагонных ветров. Весной на поверхности воды могут формироваться плавающие маты из прошлогоднего растительного опада, особенно тростника, а в зонах со слабым водообменом - сплавины, существующие многие годы и являющиеся очагами заболачивания акваторий.

Перехват твердого материала, переносимого потоком воды, происходит не только на ее поверхности, но и по всей водной толще и на дне. Частицы, фрагменты растений и предметы антропогенного происхождения, плотность которых близка к плотности воды, перемещаются по всей ее толще и, достигнув зарослей BBP, задерживаются стеблями и листьями погруженной BBP и подводными частями воз-



Рис. 3. Изменение степени задержания пластиковых микропленок со средним размером 4.5 мм тростником обыкновенным в зависимости от концентрации микрочастиц в зарослях ВВР и проективного покрытия.

Fig. 3. Change in the retention rate of plastic microparticles (films) 4.5 mm in average size by common reed depending on the concentrations of microparticles in the thickets of higher aquatic plants and projective cover.

душно-водных растений. В толще воды также возможно формирование объемных запруд как из материала, перемещающегося под водой, так и из материала, накопившегося на ее поверхности и под давлением верхних слоев и формирующегося напора воды выдавливаемого вглубь водной толщи. Основным материалом таких запруд, которые могут достигать дна, являются крупные и мелкие древесные фрагменты, составляющие ее каркас и дополненные жесткими фрагментами воздушно-водных растений и листьями как ВВР, так и древесной растительности. Просветы и поры в этой структуре со временем забиваются находящимся в воде детритом. Пористая структура таких запруд и вдольбереговых образований из произрастающей воздушно-водной ВВР, неразложившегося растительного опада и детрита является эффективным естественным фильтром, препятствующим попаданию твердых частиц различной природы с водосбора в водоем.

Гидравлическое сопротивление у дна водных объектов всегда выше, чем сопротивление разных слоев жидкости. В зарастающих зонах это сопротивление усиливается прикорневыми частями растений, корнями, корневищами и турионами, а также созданными ими неровностями в поверхности грунтов дна. Кроме того, на дне прибрежной зоны часто скапливается растительный опад как автохтонного происхождения, так и привнесенный с водосбора. Все это, вместе с минимальными скоростями движения воды, создает значительные препятствия для частиц, перемещающихся в придонной области и перекатывающихся по поверхности дна.

Как уже было сказано, на поведение микрочастиц в водном объекте влияет не только структура состояния и свойства макрофитов, но и происхождение и размер микрочастиц. Будет ли частица плавать по поверхности воды, перемещаться в водной толще или опустится на дно - зависит от плотности исходного материала, ее массы и формы, а также характеристики водной среды: плотности, поверхностного натяжения, скорости движения, турбулентности и вязкости воды, зависящей от температуры. Если для наземных экосистем плотность микрочастиц не имеет существенного значения, то для частиц, попавших в водную среду, это пороговая характеристика, определяющая их плавучесть, способность к миграции и дальнейшую судьбу. Кроме того, при длительном нахождении в природной среде изначальные физические характеристики синтетических полимерных материалов модифицируются под воздействием механического разрушения, биогеохимических процессов, фотохимической деградации, биологического обрастания и коагуляции.

Заключение

Макрофиты играют существенную барьерную роль при поступлении пластиковых микрочастиц с загрязненных территорий суши в водный объект. Их влияние проявляется как в прямом механическом задержании микрочастиц листьями и стеблями растений, так и через изменение скоростной структуры потока воды и гидродинамической активности водных масс, а также в результате средообразующей роли макрофитов и свойств самих микрочастиц. Впервые рассмотрены возможные механизмы задержания пластиковых микрочастиц макрофитами, различная природа этих механизмов и комплексный характер проявления, что позволяет объяснить, почему в зарослях ВВР в воде, в донных отложениях и на самих растениях обнаруживаются концентрации пластиковых микрочастиц на порядки выше, чем на прилегающих акваториях. Полученные результаты могут быть использованы на практике для создания буферных зон из макрофитов для предотвращения и регулирования загрязнения водных объектов микропластиком и другими загрязнителями, особенно на урбанизированных территориях. Способность макрофитов притягивать некоторые виды микропластиков в результате взаимодействия электрических полей может быть использована для создания технических устройств и методов улавливания пластиковых микрочастиц в водной и воздушной среде, на поверхности грунта, а также при очистке сточных вод.

Наиболее перспективным и востребованным направлением дальнейших исследований взаимодействия пластиковых микрочастиц и ВВР является изучение в натурных и лабораторных условиях барьерной роли природных и искусственно созданных буферных зон с макрофитами, с учетом многообразия их морфологических и экологических особенностей, а также многообразия микропластика, включая различные исходные полимерные материалы, диапазоны размеров, формы, степень выветривания и изменение физико-химических свойств микрочастиц.

Список литературы

1. Казмирук В.Д. 1990. Гидравлические сопротивления высшей водной растительности. Водные ресурсы, 1: 101–108.

2. Казмирук В.Д. **2020.** Микропластик в окружающей среде: Нарастающая проблема планетарного масштаба. М.: URSS, 432 с.

3. Казмирук В.Д. **2021.** Барьерная роль макрофитов при загрязнении водных объектов микропластиком. *Наука. Инновации. Технологии*, 3: 133–149.

4. Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н., Бреховских В.Ф. **2004.** Зарастающие водотоки и водоемы: Динамические процессы формирования донных отложений. М.: Наука, 310 с.

5. Bai Z., Wang N., Wang M. 2021. Effects of microplastics on marine copepods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217: 112243. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112243

6. Chen S., Sanfod L.P., Koch E.W., Shi F., North E.W. **2007.** A nearshore model to investigate the effects of seagrass bed geometry on wave attenuation and suspended sediment transport. *Estuaries and Coasts*, 30(2): 296–310. https://doi.org/10.1007/BF02700172

7. Di M., Liu L., Wang W., Wang J. **2019.** Manuscript prepared for submission to environmental toxicology and pharmacology pollution in drinking water source areas: Microplastics in the Danjiangkou Reservoir, China. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 65: 82–89. https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.12.009

8. Eitzen L., Paul S., Braun U., Altmann K., Jekel M., Ruhl A.S. **2019.** The challenge in preparing particle suspensions for aquatic microplastic research. *Environmental Research*, 168: 490–495. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.09.008

9. Esiukova E.E., Lobchuk O.I., Volodina A.A., Chubarenko I.P. **2021.** Marine macrophytes retain microplastics. *Marine Pollution Bull.*, 171: 112738. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112738

10. Goss H., Jaskiel J., Rotjan R. **2018.** *Thalassia testudinum* as a potential vector for incorporating microplastics into benthic marine food webs. *Marine Pollution Bull.*, 135: 1085–1089. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.024

11. Horvath T.G. **2004.** Retention of particulate matter by macrophytes in a first-order stream. *Aquatic Botany*, 78(1): 27–36. https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2003.09.003

12. Jones K.L., Hartl M.G.J., Bell M.C., Capper A. **2020.** Microplastic accumulation in a *Zostera marina* L. bed at Deerness Sound, Orkney, Scotland. *Marine Pollution Bull.*, 152: 110883. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110883

13. Kalčíková G. **2020.** Aquatic vascular plants – A forgotten piece of nature in microplastic research. *Environmental Pollution*, 262: 114354. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114354

14. Kukkola A., Krause S., Lynch I., Sambrook Smith G.H., Nel H. **2021.** Nano and microplastic interactions with freshwater biota – Current knowledge, challenges and future solutions. *Environment International*, 152: 106504. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106504

15. Luther M.E., Leonard L.A. **1995.** Flow hydrodynamics in tidal marsh canopies. *Limnology and Oceanography*, 40(8): 1474–1484. https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.8.1474

16. Quartet S., Kroo'n A., Augustinus P.G.E.F., Van Santen P., Tri N.H.J. **2007.** Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta, Vietnam. *Asian Earth Science*, 29(4): 576–584. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.05.008

17. Santos C.B., de los, Krång A.-S., Infantes E. **2021.** Microplastic retention by marine vegetated canopies: Simulations with seagrass meadows in a hydraulic flume. *Environmental Pollution*, 269: 116050. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116050

18. Sendra M., Sparaventi E., Novoa B., Figuera A. **2021.** An overview of the internalization and effects of microplastics and nanoplastics as pollutants of emerging concern in bivalves. *Science of the Total Environment*, 753: 142024. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142024

19. Stead J.L., Cundy A.B., Hudson M.D., Thompson Ch.E.L., Williams I.D., Russell A.E., Pabortsava K. **2020.** Identification of tidal trapping of microplastics in a temperate salt marsh system using sea surface microlayer sampling. *Scientific Reports*, 10: 14147. https://doi.org/10.1038/s41598-020-70306-5

References

1. Kazmiruk V.D. **1990.** Hydraulic resistances of higher aquatic vegetation. *Vodnye resursy*, 17(1): 101–108. (In Russ.).

2. Kazmiruk V.D. **2020.** *Mikroplastik v okruzhayushchey srede: Narastayushchaya problema planetarnogo masshtaba [Microplastics in the environment: the growing problem of a planetary scale]*. Moscow: URSS, 432 p. (In Russ.).

3. Kazmiruk V.D. **2021.** The barrier role of macrophytes in pollution of water bodies with microplastics. *Science. Innovations. Technologies*, 3: 133–149. (In Russ.)

4. Kazmiruk V.D., Kazmiruk T.N., Brekhovskikh V.F. **2004.** Overgrown streams and reservoirs: Dynamic processes of formation of bottom sediments. Moscow: Nauka Press, 310 p. (In Russ.).

5. Bai Z., Wang N., Wang M. 2021. Effects of microplastics on marine copepods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217: 112243. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112243

6. Chen S., Sanfod L.P., Koch E.W., Shi F., North E.W. **2007.** A nearshore model to investigate the effects of seagrass bed geometry on wave attenuation and suspended sediment transport. *Estuaries and Coasts*, 30(2): 296–310. https://doi.org/10.1007/BF02700172

7. Di M., Liu L., Wang W., Wang J. **2019.** Manuscript prepared for submission to environmental toxicology and pharmacology pollution in drinking water source areas: Microplastics in the Danjiangkou Reservoir, China. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 65: 82–89. https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.12.009

8. Eitzen L., Paul S., Braun U., Altmann K., Jekel M., Ruhl A.S. **2019.** The challenge in preparing particle suspensions for aquatic microplastic research. *Environmental Research*, 168: 490–495. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.09.008

9. Esiukova E.E., Lobchuk O.I., Volodina A.A., Chubarenko I.P. **2021.** Marine macrophytes retain microplastics. *Marine Pollution Bull.*, 171: 112738. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112738

10. Goss H., Jaskiel J., Rotjan R. **2018.** *Thalassia testudinum* as a potential vector for incorporating microplastics into benthic marine food webs. *Marine Pollution Bull.*, 135: 1085–1089. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.024

11. Horvath T.G. **2004.** Retention of particulate matter by macrophytes in a first-order stream. *Aquatic Botany*, 78(1): 27–36. https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2003.09.003

12. Jones K.L., Hartl M.G.J., Bell M.C., Capper A. **2020.** Microplastic accumulation in a *Zostera marina* L. bed at Deerness Sound, Orkney, Scotland. *Marine Pollution Bull.*, 152: 110883. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110883

13. Kalčíková G. **2020.** Aquatic vascular plants – A forgotten piece of nature in microplastic research. *Environmental Pollution*, 262: 114354. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114354

14. Kukkola A., Krause S., Lynch I., Sambrook Smith G.H., Nel H. **2021.** Nano and microplastic interactions with freshwater biota – Current knowledge, challenges and future solutions. *Environment International*, 152: 106504. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106504

15. Luther M.E., Leonard L.A. **1995.** Flow hydrodynamics in tidal marsh canopies. *Limnology and Oceanography*, 40(8): 1474–1484. https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.8.1474

16. Quartet S., Kroo'n A., Augustinus P.G.E.F., Van Santen P., Tri N.H.J. **2007.** Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta, Vietnam. *Asian Earth Science*, 29(4): 576–584. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.05.008

17. Santos C.B., de los, Krång A.-S., Infantes E. **2021.** Microplastic retention by marine vegetated canopies: Simulations with seagrass meadows in a hydraulic flume. *Environmental Pollution*, 269: 116050. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116050

18. Sendra M., Sparaventi E., Novoa B., Figuera A. **2021.** An overview of the internalization and effects of microplastics and nanoplastics as pollutants of emerging concern in bivalves. *Science of the Total Environment*, 753: 142024. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142024

19. Stead J.L., Cundy A.B., Hudson M.D., Thompson Ch.E.L., Williams I.D., Russell A.E., Pabortsava K. **2020.** Identification of tidal trapping of microplastics in a temperate salt marsh system using sea surface microlayer sampling. *Scientific Reports*, 10: 14147. https://doi.org/10.1038/s41598-020-70306-5

kazm@iwp.ru

Сведения об авторе

КАЗМИРУК Василий Данилович (https://orcid.org/0000-0001-5241-174Х), кандидат географических наук, старший научный сотрудник группы моделирования продукционно-деструкционнных процессов, Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН), Москва, Researcher ID P-3332-2014, kazm@iwp.ru KAZMIRUK Vasily D. (https://orcid.org/0000-0001-5241-174X), Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher of the Group of production-destruction processes modelling, Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences (WPI RAS), Moscow, Researcher ID P-3332-2014,

388

About the Author

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 550.72+574.4

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.389-393.394-398

Взаимосвязь распределения метана и психро-, мезои термофильных углеводородокисляющих микроорганизмов в донных отложениях в Карском море

© 2021 А. Л. Пономарева*¹, Н. С. Полоник¹, А. И. Обжиров¹, Р. Б. Шакиров¹, Р. А. Григоров¹, Оливер Шмале², Сюзан Мау³

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия ²Институт Лейбница по исследованию Балтийского моря, Варнемюнде, Германия ³Бременский университет, Бремен, Германия *E-mail: ponomareva.al@poi.dvo.ru

Резюме. Представлены данные о распределении биоиндикаторных термофильных углеводородокисляющих микроорганизмов в поверхностном слое нефтегазоносных донных отложений в Карском море и их взаимосвязи с содержанием метана. Обнаруженные в зоне отсутствия постоянного теплового потока культивируемые термофильные микроорганизмы, способные использовать в качестве единственного источника углерода углеводороды нефти, могут служить индикаторами залежей нефти и газа. В работе были созданы накопительные культуры бактерий, которые инкубировали при температуре +5, +30 и +60 °C. Установлено, что углеводородокисляющий микробиом в основном представлен мезо- и психрофильные нефтеокисляющие микроорганизмы. Термофильные бактерии данного трофического типа были выявлены только на одной из исследуемых станций, расположенной в южной части Новоземельской впадины.

Ключевые слова: метан, термофильные углеводородокисляющие бактерии, биоиндикаторные микроорганизмы, морские донные отложения, Карское море

Interrelation of methane distribution with psychro-, mesoand thermophilic hydrocarbon-oxidizing microorganisms in the bottom sediments of the Kara Sea

Anna L. Ponomareva^{*1}, Nikita S. Polonik¹, Anatoly I. Obzhirov¹, Renat B. Shakirov¹, Roman A. Grigorov¹, Oliver Schmale², Susan Mau³

¹V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia ²The Leibniz Institute for Baltic Sea Research, Warnemünde, Germany ³University of Bremen, Bremen, Germany *E-mail: ponomareva.al@poi.dvo.ru

Abstract. The article presents data on the distribution of bioindicator thermophilic hydrocarbon-oxidizing microorganisms in the surface layer of bottom oil and gas bearing sediments in the Kara Sea and their interrelation with methane content. Cultivated thermophilic microorganisms capable of using oil hydrocarbons as the only carbon source found in the zone of no constant heat flow are indicators of oil and gas deposits. In the work, enrichment cultures of bacteria were created, which were incubated at the different temperatures of +5, +30 and +60 °C. It was found that, the hydrocarbon-oxidizing microbiome is mainly represented by meso- and psychrophilic microorganisms. The stations with the highest methane content were dominated by mesophilic oil-oxidizing microorganisms. Thermophilic bacteria of this trophic type were identified only at one of the studied stations, located in the southern part of the Novozemelskaya Depression.

Keywords: methane, thermophilic hydrocarbon-oxidizing bacteria, bioindicative microorganisms, sea bottom sediments, Kara Sea

Для цитирования: Пономарева А.Л., Полоник Н.С., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б., Григоров Р.А., Шмале О., Мау С. Взаимосвязь распределения метана и психро-, *For citation:* Ponomareva A.L., Polonik N.S., Obzhirov A.I., Shakirov R.B., Grigorov R.A., Schmale O., Mau S. Interrelation of methane distribution with psychro-, meso- and ther-

мезо и термофильных углеводородокисляющих микроорганизмов в донных отложениях в Карском море. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 4, с. 389–398. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.389-393.394-398. mophilic hydrocarbon-oxidizing microorganisms in the Kara Sea. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 389–398. (Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.389-393.394-398.

Благодарности и финансирование

Исследование поддержано РФФИ (20-55-12010 «Источники и динамика эмиссии метана в двух разных арктических окраинных морях»). Работа выполнена по проекту ЮНЕСКО «Геосистемы и минеральные ресурсы переходной зоны «континент–океан» и открытого океана» (ГЕОМИР, рук. Р.Б. Шакиров) в рам-ках Десятилетия наук об океане ООН (2021–2030 гг.).

Авторы признательны научному составу экспедиции 81 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» и выражают особую благодарность начальнику экспедиции академику РАН М.В. Флинту за совместную работу.

Введение

Карское море является частью Арктического бассейна и играет ведущую роль в формировании среды всей Арктики [Лисицын и др., 1994; Мошаров, Мошарова, 2010]. Согласно устоявшимся взглядам, шельф Карского моря представляет собой богатейший резерв для открытия новых нефтегазовых месторождений в российской Арктике [Ананьев, 2010; Ананьев, Косенкова, 2010; Конторович, Конторович, 2010; Григоренко и др., 2006]. Доля Карского моря, включая северные части Западно-Сибирской и Баренцево-Северо-Карской нефтегазоносных провинций, в общей структуре начальных суммарных геологических ресурсов углеводородов арктического шельфа России – 39 % [Григоренко и др., 2006]. Карское море включает три основных тектонических элемента разного возраста формирования, с различной внутренней структурой. С юга на север это Южно-Карский осадочный бассейн, Северо-Сибирский порог и Северо-Карский осадочный бассейн [Вержбицкий и др., 2012].

Микробиом Карского моря изучен с помощью молекулярно-генетических методов достаточно хорошо, но при этом не описано распределение углеводородокисляющих бактерий в зависимости от содержания метана. В бактериальных сообществах донных отложений исследуемого региона, по литературным данным, доминируют представители филумов *Cyanobacteria, Verrucomicrobia, Actinobacteria, Proteobacteria, Bacteroidetes.* Архейные сообщества представлены в меньшей степени и включают представителей филумов *Thaumarchaeota* и *Crenarchaeota* [Suslova et al., 2012; Mamaeva et al., 2016].

На распределение бактерий в донных отложениях влияет большое число комбинированных факторов, таких, например, как пассивное рассредоточение и экологический отбор, но вклад каждого из этих факторов трудно дифференцировать. Температура имеет фундаментальное влияние на микробную экологию и скорость метаболизма микроорганизмов. Поскольку термофильные бактерии не могут расти на холодном морском дне, их неактивные формы не подвергаются селекции окружающей среды. При этом данное свойство углеводородокисляющих бактерий позволяет им играть важную роль в поддержании микробного метаболизма в глубокой теплой морской биосфере, в частности в залежах нефти [de Rezende et al., 2013; Hubert et al., 2010; Robador et al., 2016]. Поэтому термофильность в сочетании со способностью микроорганизмов окислять углеводороды может являться показателем нефтегазопроявлений.

В Арктическом регионе термофильные бактерии в основном выделяют в районах либо палео-, либо активной гидротермальной деятельности. В районах активной гидротермальной деятельности существует большое разнообразие нефтеокисляющих и сульфатредуцирующих микроорганизмов [Jaeschke et al., 2012; Steinsbu et al., 2011; McBee, McBee, 1956]. Вопрос о наличии термофильных бактерий в газовых сипах и прилегающих к ним аномальных газовых полях в Карском море изучен крайне мало.

Районы исследования, материалы и метод

Научные работы проводились на борту НИС «Академик Мстислав Келдыш» в рейсе АМК-81 (с 27 августа по 25 сентября 2020 г.). Географически район работ охватывал акваторию от 71° 12.973 N до 76° 56.873 N и от 57°08.070 Е до 72°13.863 Е в Карском море, включая район восточного побережья Новой Земли и Новоземельскую впадину (рис. 1). Образцы керна были получены методом малоглубинного бурения с помощью гравитационного пробоотборника из нержавеющей стали с внутренним диаметром 130 мм и длиной 600 см. Всего поднято и проанализировано 6 трубок.

Пробы донных осадков отбирали в соответствии с требованиями ГОСТ 17.1.5.01-80. Для анализов использовали окисленный (поверхностный) слой керна. Учет численности углеводородокисляющих микроорганизмов проводили методом предельных разведений (титрационный метод) [Абакумов (ред.), 1983]. Посев производили в жидкие среды. Наличие или отсутствие роста отмечали визуально по помутнению среды, образованию пленки или осадка. Наиболее вероятную численность устанавливали по таблице Мак-Креди [Егоров (ред.), 1976].

Нефтеокисляющие бактерии культивировали на плотной питательной минеральной среде следующего состава (в г на 1000 мл): 10 (NH₄)SO₄, 1.1 KCl, 30 NaCl, 0.28 FeSO₄, 3.4 KH₂PO₄, 4.4 K₂HPO₄, 0.7 MgSO₄×7H₂O плюс 0.5 мл раствора микроэлементов. Раствор микроэлементов включал (в г на 1000 мл): 0.29 ZnSO₄, 0.24 CaCl₂, 0.25 CuSO₄, 0.17 MnSO₄. pH среды равен 7. В среду в качестве источника углерода добавляли 2 % стерильной нефти. Культивирование проводили при температурах +5, +30, +60 °C в течение 7 дней аэробно в колбах 100 мл на орбитальном шейкере «DSR-2100D-N» со скоростью вращения 150 об./мин.

Концентрации метана в морском осадке определяли методом Headspace. Осадок объемом 12 мл отбирали из керна при помощи шприцевого пластикового пробоотборника. Отобранный осадок переносили в стеклянную виалу емкостью 43 мл, заполненную насыщенным солевым раствором. Виалу немедленно герметично запирали пластиковой пробкой с резиновой септой и медицинской иглой удаляли излишки воды и воздуха. Виалы равновесно заполнялись гелием (12 мл) при помощи пластикового мешка Tedlar Bag Dual Valve (США) с двумя клапанами: через первый клапан заполняли гелием мешок, через второй, с помощью иглы, - виалу с образцом. В качестве газовой фазы использовался чистый гелий марки «6.0». Затем содержимое виалы интенсивно перемешивали вручную до полной гомогенизации осадка внутри виалы. Перед проведением анализа виалы с гомогенизированным осадком встряхивали в течение 3.5 ч с помощью шейкера LOIPLS-110 (Россия). Для анализа 5 мл газовой фазы равновесно извлекали шприцем и вводили в инжектор газового хроматографа.

Концентрации метана в газовой фазе определяли на газовом хроматографе «ЭХО-ЕW мод.2» (Россия) с пламенно-ионизационным детектором и металлической поликапиллярной колонкой (длина 2 м, толщина 0.2–0.3 мм, фаза Hayesep SD). Разделение компонентов происходило в изотермическом режиме при температуре колонки 50 °С. Температура детектора (ПИД) составляла 190 °С. В качестве газа-носителя использовался чистый гелий марки «6.0». Для калибровки прибора применялись сертифицированные поверочные газовые смеси (ООО «ПГС-Сервис», Россия) с объемными концентрациями метана в гелии 0.001, 0.005 и 0.01 %. Для расчетов и систематизации полученных в рейсе данных применялись электронные таблицы Microsoft Excel. Получаемые данные непосредственно после обработки вводили в геоинформационное приложение Ocean Data View для интерпретации.

Результаты и обсуждение

В окисленном слое донных отложений углеводородокисляющие бактерии были обнаружены при содержании метана от 8.4 до 33.87 мл/л вдоль восточного побережья Новой земли и Новоземельской впадины. На станциях 6877 и 6887 углеводородокисляющие микроорганизмы не выявлены. Обе эти станции характеризуются невысокими значениями содержания метана (8.3 и 5.3 мл/л соответственно) (см. таблицу).

Численность мезофилов, определенная методом Мак-Креди, в незначительной степени зависела от колебаний содержания метана. Наибольшую численность этой группы фиксировали на станции 6879 с высоким содержанием метана (33.87 мл/л) и на станции 6912, расположенной в Ноземельской впадине, на которой была выявлена низкая концентрация метана (8.4 мл/л), - 4300 и 3500 кл/г соответственно. На станции 6879 численность мезои психрофильных углеводородокисляющих бактерий была сопоставима (4300 и 3300 кл/г соответственно). На станции же 6912 количество мезофильных нефтеокисляющих микроорганизмов значительно превышало тот же показатель для психрофильных (3500 и 100 кл/г соответственно). Только психрофильные микроорганизмы были зафиксированы на станции 6919 и 6916.

Nº	E	Содержание	Нефтеокис	ляющие бан	терии, кл/г	Magna Haranaana amaaaaa
станции	тлубина, м	метана, мл/л	+60 °C	+30 °C	+5 °C	местоположение станции
6877	85	8.3	_	_	_	Акватория Карского моря
6879	172	33.87	_	4300	3300	Желоб Святой Анны (южная часть)
6883	183	13.2	_	800	_	Желоб Святой Анны (центральная часть)
6887	528	5.3	_	_	_	Желоб Святой Анны (северная часть)
6919	195	9.4	_	_	500	Зал. Русанова, Новая Земля
6912	300	8.4	_	3500	100	Новоземельская впадина
6916	315	18.9	_	_	600	Там же
6928	250	14.8	200	100	_	Новоземельская впадина (южная часть)

Таблица.	Численность	термо-, и	мезо- и п	сихрофи.	льных	углеводор	одокисляющих	к микроорг	анизмов в	поверх-
ностном	слое донных	отложені	ий в Каро	ском мор	e					

Примечание. Прочерк – углеводородокисляющие бактерии не обнаружены.

Термофильные нефтеокисляющие микроорганизмы (200 кл/г) обнаружены только на одной станции 6928, расположенной в южной части Новоземельской впадины с высоким (14.8 мл/л), но не максимальным для района исследований содержанием метана. На этой станции выявлены также мезофильные нефтеокисляющие (100 кл/г) микроорганизмы. Мезофильные культуры представлены длинными тонкими палочками. Термофильные бактерии относительно однородны по морфологическому составу и представлены тонкими и/или



Рис. 1. Карта района исследований с обозначенными на ней станциями отбора донных отложений. Распределение содержания метана и мест обнаружения психро-, мезо- и термофильных углеводородокисляющих бактерий в донных отложениях Карского моря. Станции, на которых были выявлены бактерии: 1 – психрофильные углеводородокисляющие, 2 – мезофильные углеводородокисляющие, 3 – термофильные углеводородокисляющие. Незалитые кружки – станции, на которых углеводородокисляющие бактерии не были обнаружены.

бочкообразными палочками. Наличие термофильных микроорганизмов может быть связано с гидротермальной активностью или выходом газа с глубин. Данные предположения косвенно подтверждаются тем, что осадок на станции обнаружения термофилов серо-черный с содержанием сульфидов, плотный, восстановленный, с большим содержанием гидротроилита.

Результаты исследования показали, что содержание метана в донных отложениях в разной степени влияло на обнаружение психро-,

> мезо- и термофильных углеводородокисляющих микроорганизмов. Психрофильные и мезофильные микроорганизмы встречались с одинаковой частотой. Наибольшее влияние содержание метана оказывало на численность психрофильных углеводородокисляющих микроорганизмов. Мезофилы в меньшей степени реагировали на изменение содержания метана. Термофилы обнаружены только на одной станции с содержанием метана 14.8 мл/л, расположенной вблизи прол. Карские ворота.

Выводы

По данным нашего исследования, наибольшее влияние метан оказывал на психрофильные микроорганизмы, которые способны к росту в холодных донных отложениях, что обусловлено в большей степени благоприятными условиями для выживаемости данной группы в окисленном слое донных отложений Карского моря. Психрофильные углеводородокисляющие бактерии были связаны с содержанием метана независимо от его источника. На численность мезофильных углеводородокисляющих бактерий содержание метана оказывало незначительное влияние. Термофилы были зафиксированы только на одной станции и могут быть обусловлены выходами метана, что косвенно подтверждается типом осадка. Поэтому термофильные углеводородокисляющие микроорганизмы показали наибольшую биоиндикационную значимость.

Список литературы

1. Абакумов В.А. (ред.) **1983.** *Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений*. Л.: Гидрометеоиздат, 240 с.

2. Ананьев В.В. **2010.** Проблемы и перспективы освоения ресурсной базы углеводородов в арктических акваториях России. *Минеральные ресурсы России*. *Экономика и управление*, 3: 42–47.

3. Ананьев В.В., Косенкова Н.Н. **2010.** Арктический шельф: «ресурсы для будущего». *Нефтяное хозяйство*, 12: 16–19.

4. Вержбицкий В.Е., Косенкова Н.Н., Ананьев В.В., Малышева С.В., Васильев В.Е., Мурзин Р.Р., Комиссаров Д.К., Рослов Ю.В. **2012.** Геология и углеводородный потенциал Карского моря. *Oil and Gas J.*, 110 (1): 48–54.

5. Григоренко Ю.Н., Мирчинк И.М., Савченко В.И., Сенин Б.В., Супруненко О.И. **2006.** Углеводородный потенциал континентального шельфа России: состояние и проблемы освоения. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*, спец. вып. *Минеральные ресурсы российского шельфа*. М., с. 14–69.

6. Егоров Н.С. (ред.) 1976. Практикум по микробиологии. М.: Изд-во МГУ, 308 с.

7. Конторович А.Э., Конторович В.А. **2010.** Геология и ресурсы углеводородов шельфов арктических морей России. В кн.: Материалы совместного заседания Совета РАН по координации деятельности региональных отделений и региональных научных центров РАН и Научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики. УрО РАН, с. 59–68.

8. Лисицын А.П., Шевченко В.П., Виноградов М.Е., Северина О.В., Вавилова В.В., Мицкевич И.Н. **1994.** Потоки осадочного вещества в Карском море и в эстуариях Оби и Енисея. *Океанология*, 34(5): 748–758.

9. Мошаров С.А., Мошарова И.В. **2010.** Сравнительный анализ продукционных и микробиологических характеристик Карского и Чукотского морей. В кн.: *Физические, геологические и биологические ис*следования океанов и морей. М.: Научный мир, с. 494–505.

10. Hubert C., Arnosti C., Bruchert V., Loy A., Vandieken V., Jorgensen B.B. **2010.** Thermophilic anaerobes in Arctic marine sediments induced to mineralize complex organic matter at high temperature. *Environmental Microbiology*, 12(4): 1089–1104. https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2010.02161.x

11. Jaeschke A., Jorgensen S.L., Bernasconi S.M., Pedersen R.B., Thorseth I.H., Fruh-Green G.L. **2012.** Microbial diversity of Loki's Castle black smokers at the Arctic Mid-Ocean Ridge. *Geobiology*, 10(6): 548–561. https://doi.org/10.1111/gbi.12009

12. Mamaeva E.V., Galach'yants Y.P., Khabudaev K.V., Petrova D.P., Pogodaeva T.V., Khodzher T.B., Zemskaya T.I. **2016.** Metagenomic analysis of microbial communities of the sediments of the Kara Sea shelf and the Yenisei Bay. *Microbiology*, 85(2): 187–198. https://doi.org/10.1134/s0026261716020132

13. McBee R.H., McBee V.H. **1956.** The incidence of thermophilic bacteria in arctic soils and waters. J. of Bacteriology, 71(2): 182–185. https://doi.org/10.1128/jb.71.2.182-185.1956

14. de Rezende J.R., Kjeldsen K.U., Jorgensen B.B. **2013.** Dispersal of thermophilic *Desulfotomaculum* endospores into Baltic Sea sediments over thousands of years. *ISME J.*, 7(1): 72–84. https://doi.org/10.1038/ismej.2012.83

15. Robador A., Muller A.L., Sawicka J.E., Berry D., Hubert C., Loy A., Jorgensen B.B., Bruchert V. **2016.** Activity and community structures of sulfate-reducing microorganisms in polar, temperate and tropical marine sediments. *ISME J.*, 10(4): 796–809. https://doi.org/10.1038/ismej.2015.157

16. Steinsbu B.O., Tindall B.J., Torsvik V.L., Thorseth I.H., Daae F.L., Pedersen R.B. **2011**. *Rhabdothermus arcticus* gen. nov., sp. nov., a member of the family Thermaceae isolated from a hydrothermal vent chimney in the Soria Mona vent field on the Arctic Mid-Ocean Ridge. *International J. of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 61(9): 2197–2204. https://doi.org/10.1099/ijs.0.027839-0

17. Suslova M.Yu., Lipko I.A., Mamaeva E.V., Parfenova V.V. **2012.** Diversity of cultivable bacteria isolated from the water column and bottom sediments of the Kara Sea shelf. *Microbiology*, 81(4): 524–31. https://doi.org/10.1134/s0026261712040157

TRANSLATION SHORT REPORT https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.389-393.394-398

УДК 550.72+574.4

Interrelation of methane distribution with psychro-, mesoand thermophilic hydrocarbon-oxidizing microorganisms in the bottom sediments of the Kara Sea

Anna L. Ponomareva^{*1}, Nikita S. Polonik¹, Anatoly I. Obzhirov¹, Renat B. Shakirov¹, Roman A. Grigorov¹, Oliver Schmale², Susan Mau³

¹V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia ²The Leibniz Institute for Baltic Sea Research, Warnemünde, Germany ³University of Bremen, Bremen, Germany *E-mail: ponomareva.al@poi.dvo.ru

Abstract. The article presents data on the distribution of bioindicator thermophilic hydrocarbon-oxidizing microorganisms in the surface layer of bottom oil and gas bearing sediments in the Kara Sea and their interrelation with methane content. Cultivated thermophilic microorganisms capable of using oil hydrocarbons as the only carbon source found in the zone of no constant heat flow are indicators of oil and gas deposits. In the work, enrichment cultures of bacteria were created, which were incubated at the different temperatures of +5, +30 and +60 °C. It was found that, the hydrocarbon-oxidizing microbiome is mainly represented by meso- and psychrophilic microorganisms. The stations with the highest methane content were dominated by mesophilic oil-oxidizing microorganisms. Thermophilic bacteria of this trophic type were identified only at one of the studied stations, located in the southern part of the Novozemelskaya Depression.

Keywords: methane, thermophilic hydrocarbon-oxidizing bacteria, sea bottom sediments, Kara Sea

For citation: Ponomareva A.L., Polonik N.S., Obzhirov A.I., Shakirov R.B., Grigorov R.A., Schmale O., Mau S. Interrelation of methane distribution with psychro-, meso- and thermophilic hydrocarbon-oxidizing microorganisms in the bottom sediments of the Kara Sea. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 389–398. ((In Russ. & Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.389-393.394-398

Acknowledgements and Funding

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (20-55-12010 "Sources and dynamics of methane emission in two different Arctic marginal seas"). The work was implemented within the project of UNESCO "Geosystems and Mineral resources in the "Continent-Ocean" transition zone and the Open Ocean" (GEOMIR, headed by R.B. Shakirov) under the United Nations Decade of Ocean Science (2021–2030). The authors are grateful to the scientific staff of the expedition 81 of the cruise of the R / V "Akademik Mstislav Keldysh" and express special gratitude to the head of the expedition, Academician of the Russian Academy of Sciences, M.V. Flint, for their joint work.

Introduction

The Kara Sea is a part of the Arctic Basin and plays a leading role in formation of the environment of the entire Arctic [Lisitsyn et al., 1994; Mosharov, Mosharova, 2010]. In the established views, the shelf of the Kara Sea is a richest reserve for discovering new oil and gas fields in the Russian Arctic [Ananiev, 2010; Ananiev, Kosenkova, 2010; Kontorovich, Kontorovich, 2010; Grigorenko et al., 2006]. Contribution of the Kara Sea, including northern parts of the West Siberian and Barents-North-Kara oil and gas bearing provinces, in the overall structure of initial geological hydrocarbon sources of the arctic shelf in Russia is 39 % [Grigorenko et al., 2006]. The Kara Sea includes three main tectonic elements of different age of formation, and with different internal structure. From south to north, they are the South Kara sedimentary basin, North Siberian sill and the North Kara sedimentary basin [Verzhbitsky et al., 2012].

Microbiome of the Kara Sea is studied with the molecular genetic methods well enough, but the distribution of hydrocarbon-oxidizing bacteria depending on the methane content is not described.

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Пономарева А.Л., Полоник Н.С., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б., Григоров Р.А., Шмале О., Мау С. Взаимосвязь распределения метана и психро-, мезо- и термофильных углеводородокисляющих микроорганизмов в донных отложениях в Карском море. *Translation by G.S. Kachesova*.

According to the literary data, the phyla *Cyanobacteria*, *Verrucomicrobia*, *Actinobacteria*, *Proteobacteria*, *Bacteroidetes* dominate in the bacterial communities of the bottom sediments. Archean communities are presented to a lesser extent and include the phyla *Thaumarchaeota* and *Crenarchaeota* [Suslova et al., 2012; Mamaeva et al., 2016].

The distribution of bacteria in the bottom sediments is affected by a large number of combined factors, such as passive dispersal and ecological selection, but it is difficult to differentiate the contribution of each of these factors. Temperature has a fundamental effect on microbial ecology and the metabolic rate of microorganisms. Since thermophilic bacteria cannot grow on the cold seabed, their inactive forms are not subject to the environmental selection. At the same time, this feature of hydrocarbon-oxidizing bacteria allows them to play an important role in maintaining the microbial metabolism in the deep warm marine biosphere, in oil deposits in particular [de Rezende et al., 2013; Hubert et al., 2010; Robador et al., 2016]. That is why thermophilicity along with the microorganism ability to oxidize hydrocarbons can be an indicator of oil and gas manifestations.

In the Arctic region, thermophilic bacteria are mainly found in the areas of either paleo-, or active hydrothermal activity. There is a wide variety of oiloxidizing and sulfate-reducing microorganisms in the areas of active hydrothermal activity [Jaeschke et al., 2012; Steinsbu et al., 2011; McBee, McBee, 1956]. The question of the presence of thermophilic bacteria in gas seeps and adjacent anomalous gas fields in the Kara Sea is poorly known.

Study areas, materials and method

Scientific research was carried out on board the R/V Akademik Mstislav Keldysh during the cruise AMK-81 (from August 27 to September 25 of 2020). Geographically, the study area covered the water area from 71°12.973 N to 76°56.873 N and from 57°08.070 E to 72°13.863 E in the Kara Sea, including the area of the eastern coast of Novaya Zemlya and Novozemelskaya Depression (see the Figure). Core samples were taken by the method of shallow core drilling using stainless steel gravity corer with an inner diameter of 130 mm and a length of 600 cm. A total of six tubes was pulled out and analyzed.

Bottom sediments samples were taken in accordance with the requirements of GOST 17.1.5.01-80. An oxidized (surface) core layer was used for analysis. The number of hydrocarbon-oxidizing microorganisms was counted by the method of limiting dilution (titration method) [Abakumov (ed.), 1983]. Culture was drawn in liquid media. The presence or absence of growth was noted visually by the medium turbidity, the formation of a film or sediment. The most probable number was defined according to the Mc-Cready table [Egorov (ed.), 1976].

Hydrocarbon-oxidizing bacteria were cultured on the dense breeding mineral medium of the following composition (in g per 1000 ml): 10 (NH₄) SO₄, 1.1 KCl, 30 NaCl, 0.28 FeSO₄, 3.4 KH₂PO₄, 4.4 K₂HPO₄, 0.7 MgSO₄ ×7H₂O plus 0.5 ml of the micronutrients solution. The micronutrients solution contains (in g per 1000 ml): 0.29 ZnSO₄, 0.24 CaCl₂, 0.25 CuSO₄, 0.17 MnSO₄. A pH of the medium was equal to 7. A 2 % sterile oil was added to the medium as a carbon source. Cultivation was carried out aerobically in 100 ml flasks at the temperatures of +5, +30, +60 °C for 7 days on a DSR-2100D-N orbital shaker with a rotation speed of 150 rpm.

The methane concentration in marine sediments was determined by the Headspace method. 12 ml of sediment was withdrawn from the core using a plastic syringe sampler. Withdrawn sediment was transferred into a 43 ml glass vial filled with brine. The vial was immediately sealed with a plastic stopper with a rubber septum. Excess water and air were removed by a medical needle. The vials were equally filled with helium (12 ml) by means of the Tedlar Bag Dual Valve (USA) plastic bag with two valves. The bag was filled with helium through the first valve, and the vial with a sample was filled through the second one using a needle. Pure helium of 6.0 grade was used as the gaseous phase. Then vial contents were intensively mixed in manual way until the sediment within the vial became completely homogenized. The vials with the homogenized sediment were shaken for 3.5 hours before carrying out the analysis using the LOIPLS-110 (Russia) shaker. For analysis, 5 ml of the gaseous phase were equally taken out using a syringe and put into the injector of the gas chromatograph.

The methane concentrations in the gaseous phase were determined on the ECHO-EW mod.2 gas chromatograph (Russia) equipped with a flame ionization detector and metal polycapillary column (length is 2 m, width is 0.2-0.3 mm, phase Hayesep SD). The components were separated in isothermal mode at a column temperature of 50 °C. A detector temperature (FID) was 190 °C. Pure helium of 6.0 grade was used as a carrier gas. Certified calibration gas mixtures (OOO PGS-Service, Russia) with the volume concentrations of methane in helium 0.001, 0.005 and 0.01% was used to calibrate the equipment. Microsoft Excel spreadsheets were used to compute and organize the data obtained during the cruise. The data obtained were entered into the Ocean Data View geoinformation application for interpretation immediately after processing.

Results and discussion

Hydrocarbon-oxidizing bacteria were found in the oxidized layer of the bottom sediments at the methane content from 8.4 to 33.87 ml/l along the



Figure. Map of the study area with marked stations of the bottom sediments sampling. Distribution of the methane content and places of psychro-, mesoand thermophilic hydrocarbon-oxidizing bacteria in the bottom sediments of the Kara Sea. The stations, where the bacteria were found: 1 – psychrophilic hydrocarbon-oxidizing, 2 – mesophilic hydrocarbon-oxidizing, 3 – thermophilic hydrocarbon-oxidizing. Unfilled circles – the stations where hydrocarbon-oxidizing bacteria were not found.

eastern coast of the Novaya Zemlya and Novozemelskaya Depression. Hydrocarbon-oxidizing microorganisms were not found at the stations 6877 and 6887. Both of these stations are characterized with low values of the methane content (8.3 and 5.3 ml/l, respectively) (see the Table).

The mesophiles count, determined by the McCready method, insignificantly depended on the methane content fluctuations. The maximum count of this group was recorded at the stations 6879 with high methane content (33.87 ml/l) and 6912 located in Novozemelskaya Depres-

sion, where a low methane content (8.4 ml/l) was revealed, – 4300 and 3500 cells/g, respectively. Mesoand psychrophiles hydrocarbon-oxidizing bacteria counts at the station 6879 were comparable (4300 and 3300 cells/g, respectively). But mesophiles oil-oxidizing microorganisms count at the station 6912 significantly exceeded the same indicator for psychrophilic ones (3500 and 100 cells/g, respectively). Only psychrophilic microorganisms were recorded at the stations 6919 and 6916.

Thermophilic oil-oxidizing bacteria (200 cells/g) were found only at one station 6928 located in the southern part of Novozemelskaya Depression with a high (14.8 ml/l), but not maximum for the study area, methane content. Mesophilic oil-oxidizing bacteria (100 cells/g) were also found at this station. Mesophilic cultures are represented by the long, thin rods. Thermophilic bacteria are relatively

Station no.	Depth, m	Methane content,	Hydrocar	bon-oxidizi cells/g	ng bacteria,	Station location
	1	mi/i	+60 °C	+30 °C	+5 °C	
6877	85	8.3	_	_	_	Water area of the Kara Sea
6879	172	33.87	_	4300	3300	St. Anna Trough (southern part)
6883	183	13.2	_	800	_	St. Anna Trough (central part)
6887	528	5.3	_	_	_	St. Anna Trough (northern part)
6919	195	9.4	_	_	500	Rusanov Bay, Novaya Zemlya
6912	300	8.4	_	3500	100	Novozemelskaya Depression
6916	315	18.9	_	_	600	At the same place
6928	250	14.8	200	100	-	Novozemelskaya Depression (southern part)

Table. Number of thermo-, meso- and psychrophilic hydrocarbon-oxidizing microorganisms in the surface layer of the bottom sediments in the Kara Sea

Note. Dash - hydrocarbon-oxidizing bacteria are not found.

homogeneous in morphological composition and represented by thin and/or barrel-shaped rods. The detection of thermophilic microorganisms may be associated with hydrothermal activity and gas release from the depth. These assumptions are indirectly confirmed with the fact, that the sediment at the station, where thermophiles have been found, is grey-black with sulfides content, dense, reduced, with a high hydrotroilite content.

The study results showed, that the methane content in the bottom sediments had influenced to varying degrees on the detection of psychro-, meso- and thermophilic hydrocarbon oxidizing bacteria. Psychrophilic and mesophilic microorganisms occurred with similar frequency. The methane content had the greatest effect on the count of psychrophilic hydrocarbon-oxidizing microorganisms. Mesophiles responded to change in the methane content to a lesser degree. Thermophiles were found only at one station with the methane content of 14.8 ml/l located near the Kara Strait.

Conclusion

According to the data of our study, methane has the greatest effect on psychrophilic microorganisms able to grow in the cold bottom sediments, which is mostly due to favorable conditions for this group survivorship in the oxidized layer of the bottom sediments of the Kara Sea. Psychrophilic hydrocarbon-oxidizing bacteria were associated with the methane content regardless of its source. The methane content had an insignificant effect on the count of mesophilic hydrocarbonoxidizing bacteria. Thermophiles have been found only at one station and may be conditioned by the methane release, that is indirectly confirmed with the sediment type. Therefore, thermophilic hydrocarbon-oxidizing microorganisms have demonstrated the greatest bioindication significance.

References

1. Abakumov V.A. (ed.) **1983.** [*Guide to methods of hydrobiological analysis of surface waters and bottom sediments*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 240 p. (In Russ.).

2. Ananiev V. V. **2010.** [Problems and prospects for the development of the resource base of hydrocarbons in the Arctic waters of Russia]. *Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye = Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 3: 42–47. (In Russ.).

3. Ananiev V.V., Kosenkova N.N. **2010.** [Arctic shelf: "resources for the future"]. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil industry*, 12: 16–19. (In Russ.).

4. Verzhbitsky V.E., Kosenkova N.N., Ananiev V.V., Malysheva S.V., Vasiliev V.E., Murzin R.R., Komissarov D.K., Roslov Yu. V. **2012.** Geology and hydrocarbon potential of the Kara Sea. *Oil and Gas J.*, 110 (1): 48–54. (In Russ.).

5. Grigorenko Yu.N., Mirchink I.M., Savchenko V.I., Senin B.V., Suprunenko O.I. **2006.** [Hydrocarbon potential of the continental shelf of Russia: state and development problems]. *Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye (spetsvypusk) = Mineral resources of Russia. Economics and Management*, spec. iss.: [*Mineral resources of Russian shelf*]. Moscow, p. 14–69. (In Russ.).

6. Egorov N.S. (ed.) **1976.** *Workshop on Microbiology*. Moscow: Publ. House of Moscow State University, 308 p. (In Russ.).

7. Kontorovich A.E., Kontorovich V.A. **2010.** [Geology and hydrocarbon resources of the shelves of the Arctic seas of Russia]. In: [*Materials of the joint meeting of the RAS Council for the coordination of the activities of regional branches and regional scientific centers of the RAS and the Scientific Council of the RAS for the study of the Arctic and Antarctic*]. URO RAN = UB RAS, p. 59–68. (In Russ.).

8. Lisitsyn A.P., Shevchenko V.P., Vinogradov M.Ye., Severina O.V., Vavilova V.V., Mitskevich I.N. **1994.** [Fluxes of sedimentary matter in the Kara Sea and in the estuaries of the Ob and Yenisei]. *Okeanologiya* = *Oceanology*, 34(5): 748–758. (In Russ.).

9. Mosharov S.A., Mosharova I.V. **2010.** [Comparative analysis of production and microbiological characteristics of the Kara and Chukotka seas]. In: [*Physical, geological and biological studies of oceans and seas*]. Moscow: Nauchnyy mir [Scientific world], p. 494–505. (In Russ.).

10. Hubert C., Arnosti C., Bruchert V., Loy A., Vandieken V., Jorgensen B.B. **2010.** Thermophilic anaerobes in Arctic marine sediments induced to mineralize complex organic matter at high temperature. *Environmental Microbiology*, 12(4): 1089–1104. https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2010.02161.x

11. Jaeschke A., Jorgensen S.L., Bernasconi S.M., Pedersen R.B., Thorseth I.H., Fruh-Green G.L. **2012.** Microbial diversity of Loki's Castle black smokers at the Arctic Mid-Ocean Ridge. *Geobiology*, 10(6): 548–561. https://doi.org/10.1111/gbi.12009

12. Mamaeva E.V., Galach'yants Y.P., Khabudaev K.V., Petrova D.P., Pogodaeva T.V., Khodzher T.B., Zemskaya T.I. **2016.** Metagenomic analysis of microbial communities of the sediments of the Kara Sea shelf and the Yenisei Bay. *Microbiology*, 85(2): 187–198. https://doi.org/10.1134/s0026261716020132 13. McBee R.H., McBee V.H. **1956.** The incidence of thermophilic bacteria in arctic soils and waters. *J. of Bacteriology*, 71(2): 182–185. https://doi.org/10.1128/jb.71.2.182-185.1956

14. de Rezende J.R., Kjeldsen K.U., Jorgensen B.B. **2013.** Dispersal of thermophilic *Desulfotomaculum* endospores into Baltic Sea sediments over thousands of years. *ISME J.*, 7(1): 72–84. https://doi.org/10.1038/ismej.2012.83

15. Robador A., Muller A.L., Sawicka J.E., Berry D., Hubert C., Loy A., Jorgensen B.B., Bruchert V. **2016.** Activity and community structures of sulfate-reducing microorganisms in polar, temperate and tropical marine sediments. *ISME J.*, 10(4): 796–809. https://doi.org/10.1038/ismej.2015.157

16. Steinsbu B.O., Tindall B.J., Torsvik V.L., Thorseth I.H., Daae F.L., Pedersen R.B. **2011**. *Rhabdothermus arcticus* gen. nov., sp. nov., a member of the family Thermaceae isolated from a hydrothermal vent chimney in the Soria Mona vent field on the Arctic Mid-Ocean Ridge. *International J. of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 61(9): 2197–2204. https://doi.org/10.1099/ijs.0.027839-0

17. Suslova M.Yu., Lipko I.A., Mamaeva E.V., Parfenova V.V. **2012.** Diversity of cultivable bacteria isolated from the water column and bottom sediments of the Kara Sea shelf. *Microbiology*, 81(4): 524–31. https://doi.org/10.1134/s0026261712040157

Об авторах

ПОНОМАРЕВА Анна Леонидовна (https://orcid.org/0000-0002-4382-9156), кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории комплексных исследований окружающей среды и минеральных ресурсов, Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН им. В.И. Ильичева, Владивосток, ponomareva.al@poi.dvo.ru

ПОЛОНИК Никита Сергеевич (https://orcid.org/0000-0002-4726-9459), кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории газогеохимии, Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН им. В.И. Ильичева, Владивосток, npol86@mail.ru

ОБЖИРОВ Анатолий Иванович (https://orcid.org/0000-0002-4031-6419), доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории газогеохимии, Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН им. В.И. Ильичева, Владивосток, obzhirov@poi.dvo.ru

ШАКИРОВ Ренат Белалович (https://orcid.org/0000-0003-1202-0351), доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора, Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН им. В.И. Ильичева, Владивосток, ren@poi.dvo.ru

ГРИГОРОВ Роман Андреевич, старший инженер лаборатории комплексных исследований окружающей среды и минеральных ресурсов, Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН им. В.И. Ильичева, Владивосток, grigorov.roman1997@gmail.com

ШМАЛЕ Оливер, (https://orcid.org/0000-0003-2987-4900), доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт Лейбница по исследованию Балтийского моря, Варнемюнде, Германия, oliver. schmale@io-warnemuende.de

МАУ Сюзан (https://orcid.org/0000-0003-4186-8159), доктор геолого-минералогических наук, приглашенный научный сотрудник Исследовательской группы Общая геология - морская геология. Отдел наук о Земле, Университет Бремена, Бремен, Германия, smau@marum.de

About Authors

PONOMAREVA Anna L. (https://orcid.org/0000-0002-4382-9156), Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Laboratory for comprehensive research of the environment and mineral resources, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of the RAS, Vladivostok, ponomareva.al@poi.dvo.ru

POLONIK Nikita S. (https://orcid.org/0000-0002-4726-9459), Cand. Sci. (Chemistry), Researcher, Laboratory of gas geochemistry, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of the RAS, Vladivostok, npol86@mail.ru

OBZHIROV Anatoly I. (https://orcid.org/0000-0002-4031-6419), Doctor of Geology and Mineralogy, Principal Researcher, Laboratory of gas geochemistry, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of the RAS, Vladivostok, obzhirov@poi.dvo.ru

SHAKIROV Renat B. (https://orcid.org/0000-0003-1202-

0351), Doctor of Geology and Mineralogy, Deputy Director, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East

Branch of the RAS, Vladivostok, ren@poi.dvo.ru

GRIGOROV Roman A. Senior Engineer, Laboratory for comprehensive research of the environment and mineral resources, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of the RAS, Vladivostok, grigorov.roman1997@gmail.com

SCHMALE Oliver (https://orcid.org/0000-0003-2987-4900), Doctor of Geology and Mineralogy, Leibniz Institute for Baltic Sea Research, Warnemünde, Germany, oliver.schmale@io-warnemuende.de

MAU Susan (https://orcid.org/0000-0003-4186-8159), Doctor of Geology and Mineralogy, Visiting Researcher Fellow, Research group General Geology – Marine Geology, Department of Earth Sciences, University of Bremen, Bremen, Germany, smau@marum.de Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 574.586

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.399-427

Видовой состав и эколого-географическая характеристика фитоперифитона бассейна р. Лютога (о. Сахалин)

© 2021 И.В. Мотылькова

Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск, Россия E-mail: surirella@mail.ru

Резюме. Приведены данные о составе фитоперифитона бассейна р. Лютога, экологически значимого водотока о. Сахалин. В результате обследования эстуарной зоны, основного русла и притоков р. Лютога с февраля по декабрь 2011 г. выявлен видовой состав фитоперифитона, определен состав доминирующих видов, дана эколого-географическая характеристика (географическое распространение, отношение к местообитанию, солености, активной реакции среды, сапробность) видов, изучены трансформации видового состава фитоперифитона по мере удаленности от эстуарной зоны к верховьям реки. Альгофлора представлена 303 видами и внутривидовыми таксонами микроводорослей и цианобактерий из 9 отделов, 16 классов, 40 порядков, 65 семейств и 107 родов (аннотированный список приведен в приложении к статье). Ее основу формировали диатомовые водоросли, среди которых лидирующими семействами являются Bacillariaceae и Naviculaceae, ведущими родами – Nitzschia и Navicula. Впервые для внутренних водоемов Сахалинской области указываются 34 вида и внутривидовых таксона микроводорослей и цианобактерий. По мере удаления от эстуарной зоны к верховьям реки снижалось количество видов, разнообразие географических группировок, планктонных форм, видов – альфа-мезосапробионтов. В весенне-летний период на всех участках количественно преобладали Hannaea arcus f. recta, в осенне-зимний – Melosira varians и Rhoicosphenia abbreviata. Ключевые слова: водоросли, перифитон, экологически значимый водоток, р. Лютога, о. Сахалин

Taxonomic structure and ecology-geographical characteristic of phytoperiphyton in the Lyutoga River (Sakhalin Island)

Irina V. Motylkova

Sakhalin Branch, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (SakhNIRO), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

*E-mail: surirella@mail.ru

Abstract. The article provides the data on phytoperiphyton composition in the basin of the Lutoga River, which is an ecologically significant water course of Sakhalin Island. In result of surveying the estuary, main channel and tributaries of the Lyutoga River from February to December of 2011, the species composition of phytoperiphyton was identified, assemblage of dominant species was found, ecology-geographical characteristic (geographical distribution, habitat association, salinity, pH, saprobity) was described. The transformations of the species composition of phytoperiphyton were studied with distance from the estuarine zone to the upper reaches of the river. Algal flora was presented with 303 species and intraspecific taxa of microalgae and cyanobacteria belonged to 9 phyla, 16 classes, 40 orders, 65 families and 107 genera (annotated list see in the Appendix). It was based on diatoms, among which the leading families were Bacillariaceae and Naviculaceae, and the leading genera were *Nitzschia* and *Navicula*. For the first time, 34 species and intraspecific taxa of microalgae and cyanobacteria zone to the upper reaches of the river, the number of species, geographical groupings, planktonic forms, and alphamesosaprobiont species decreased. Mass development of *Hannaea arcus* f. *recta* were observed in the spring-summer period, *Melosira varians* and *Rhoicosphenia abbreviata* – in the autumn-winter.

Keywords: algae, periphyton, ecologically significant water course, Lyutoga River, Sakhalin Island

Для цитирования: Мотылькова И.В. Видовой состав и эколого-географическая характеристика фитоперифитона бассейна р. Лютога (о. Сахалин). Геосистемы переходных зон, 2021, т. 5, № 4, с. 399–427. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.399-427 *For citation:* Motylkova I.V. Taxonomic structure and ecology-geographical characteristic of phytoperiphyton in the Lyutoga River (Sakhalin Island). *Geosistemy perehodnykh zon= Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 399–427. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.399-427

Благодарности и финансирование

Исследования выполнены в рамках госзадания Сахалинского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (№ госрегистрации 01201151613).

Автор благодарит всех участников экспедиций за сбор перифитонных проб и предоставление данных по гидрологии реки, а также признателен Любови Анатольевне Медведевой, старшему научному сотруднику ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, за помощь в определении вида *Hydrurus foetidus*.

Автор благодарен рецензентам за внимательное прочтение рукописи и ценные замечания.

Введение

Перифитон – экологическая группировка гидробионтов, обитающих на разделе фаз вода – твердый субстрат любого происхождения и природы [Протасов, 1994]. В лотических системах часто основным его компонентом являются водоросли (фитоперифитон), изучение которых составляет часть эколого-флористических исследований. В частности, данные о видовом составе фитоперифитона позволяют оценить экологическое состояние водных экосистем, качество воды, биоразнообразие, решать вопросы в области биогеографии.

Альгофлора водотоков о. Сахалин слабо изучена. До недавнего времени пристальное внимание отводилось только фитопланктону внутренних вод и морских прибрежий острова, в то время как фитоперифитон текучих вод никем не изучался. Первые сведения о нем относятся к началу XXI в. В 2005 г. Т.В. Никулиной был представлен полный видовой список диатомовых водорослей рек южного Сахалина (р. Анна, р. Бахура, р. Мерея) [Никулина, 2005]. В дальнейшем были опубликованы таксономические списки, данные о структуре, количественных показателях, доминирующих видах водорослей перифитона некоторых водотоков западного [Коновалова, Мотылькова, 2011а; Медведева, Миски, 2011], восточного [Коновалова, Мотылькова, 2008; Коновалова, Мотылькова, 2011б; Медведева, 2013; Никулина, 2009, 2011; Nikulina, 2009; 2013; Nikulina, Kociolek, 2011] и южного побережья о. Сахалин [Латковская и др., 2014; Могильникова и др., 2013]. Результаты данных исследований обобщены в монографии Л.А. Медведевой и Т.В. Никулиной «Каталог пресноводных водорослей юга Дальнего Востока России» [Медведева, Никулина, 2014]. В 2011–2012 гг.

Acknowledgements and Funding

This work was carried out within the state assignments of the Sakhalin Research Institute of Fisheries and Oceanography (state registration no. 01201151613).

The author thanks all the participants of the expeditions for collecting periphyton samples and providing data on the hydrology of the river, and is also grateful to Lubov A. Medvedeva, Senior Researcher of the Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, for assistance in determining the species *Hydrurus foetidus*.

The Author is grateful to the Reviewers for the careful reading of the paper and valuable comments.

в бассейне р. Лютога впервые были проведены исследования фитоперифитона, результаты которых частично нашли отражение в ряде работ [Естественная история..., 2015; Лабай и др., 2017; Живоглядова и др., 2016]. В них описаны основные структурообразующие компоненты, сезонная динамика численности и биомассы, продукционные характеристики фитоперифитона.

Экологическую значимость р. Лютога трудно переоценить. Одна из крупнейших рек Сахалина, принимающая при своем течении более 10 крупных притоков, обладает немалым нерестовым потенциалом, используется для нагула и зимовки жилых форм и молоди проходных лососей с продолжительным пресноводным периодом жизни, является местом проведения лова симы и других видов рыб в режиме спортивно-любительского рыболовства. Характерной особенностью р. Лютога является протяженная эстуарная зона, которая отмечается на удалении до 10 км от устья выше г. Анива [Никитин и др., 2013]. Эстуарии являются переходными зонами взаимодействия речных и морских вод. Такие участки отличаются накоплением значительного количества взвешенного и растворенного вещества природного и антропогенного происхождения, что определяет экологическое состояние прибрежных морских экосистем [Макаревич, 2007]. Поэтому немалую роль р. Лютога играет и в формировании биологической продуктивности прибрежных вод зал. Анива.

Цель работы – определить видовой состав, дать эколого-географическую характеристику фитоперифитона, изучить трансформации видового состава фитоперифитона бассейна р. Лютога по мере удаленности от эстуарной зоны.

Материал и методика

Материалом для настоящей работы послужили перифитонные пробы, собранные с поверхности камней, деревянных предметов в бассейне р. Лютога в феврале, в апреле-декабре 2011 г. Работы выполнялись в эпиритрали (на двух притоках, один из которых, р. Партизанка, является основным нерестовым притоком р. Лютога, второй, р. Фрикена, - контрольный водоток, не имеет нерестовой значимости), мезоритрали (среднее течение р. Лютога), эстуарной зоне (1.5 км выше устья) (рис. 1). В качестве консерванта использовали 4%-й водный раствор формальдегида. Всего было отобрано 345 количественных проб фитоперифитона. Обработку материала, подсчет частоты встречаемости видов выполняли по методике, предложенной С.Ф. Комулайненом [Комулайнен, 2003, 2005]. Подготовку препаратов для диатомовых водорослей проводили методом холодной обработки концентрированной серной кислотой с последующим заключением их в канадский бальзам [Жузе и др., 1949]. Таксономический список сформирован по современной системе классификации, учитывающей правила общепризнанной международной базы данных Algaebase (https://www.algaebase.org/). Данные о приуроченности каждого вида к местообитанию, распространении, отношении их к солености воды, активной реакции среды и сапробности приведены согласно флористическим сводкам, работам ряда авторов [Никулина, 2005; Nikulina, Kociolek, 2011].

Результаты и обсуждение

Всего за период исследования в перифитоне бассейна р. Лютога было обнаружено 303 таксона водорослей рангом ниже рода из 9 отделов, 16 классов, 40 порядков, 65 семейств и 107 родов (см. прил.). Из них 10 было идентифицировано только до рода, 11 – составляли внутривидовые таксоны (разновидности и формы) (табл. 1).

Основу альгофлоры бассейна р. Люформировали диатомовые водоросли тога Bacillariophyta (84-90 % от общего количества видов на разных участках), которые в пресноводных экосистемах Дальнего Востока являются одной из ведущих по видовому разнообразию групп [Никулина, 2011]. Второе место по количеству видов и внутривидовых таксонов в общем списке занимали зеленые Chlorophyta, за ними следовали цианобактерии Cyanobacteria (табл. 2). Преимущественное положение в систематической структуре диатомовых, зеленых водорослей и цианобактерий отражает специфику фитоперифитона и других речных систем бореальной и субарктической зон [Беляева, 2011]. Наибольшее разнообразие этих отделов водорослей наблюдалось в летне-осенний период, во время наибольшей миграции и осаждения водорослей планктонных форм (Asterionella formosa, Aulacoseira subarctica, Discostella stelligera, Nitzschia ac*icularis*, *Stephanodiscus minutulus* и др.). В притоках и среднем течении реки немаловажную роль в формировании структуры перифитон-



Рис. 1. Карта-схема района работ в бассейне р. Лютога. **Fig. 1.** Schematic map of the study area in the Lyutoga River basin.

ного комплекса играли водоросли отделов Оchrophyta и Charophyta. Последние развивались преимущественно в летний период, охрофитовые – в весенний.

В десятку лидируюших семейств вхолили Bacillariaceae (41 вид внутривидовой И таксон), Naviculaceae (36), Gomphonemataceae (21), Pin-Surirellaceae (16),nulariaceae (16), Cymbellaceae (14), Fragilariaceae (9), Ulnariaceae (9), Achnanthidiaceae (8), Tabellariaceae (8). Первые два из вышеперечисленсемейств преобных ладали по числу таксо-

Отделы	Класс	Порядок	Семейство	Род	Вид	Вид, разновидность, форма
Cyanobacteria	1	3	5	7	9	10
Bacillariophyta	3	19	37	72	250	259
Cryptophyta	1	1	1	1	1	1
Charophyta	2	3	4	4	7	7
Chlorophyta	3	6	9	12	14	15
Rhodophyta	1	2	2	2	2	2
Miozoa	1	1	2	3	3	3
Ochrophyta	3	4	4	5	5	5
Cercozoa	1	1	1	1	1	1
Всего	16	40	65	107	292	303

Таблица 1. Таксономическая структура фитоперифитона бассейна р. Лютога Table 1. The taxonomic composition of phytoperiphyton in the Lutoga River basin

нов на всех исследуемых участках водотока, Pinnulariaceae, Achnanthidiaceae – в притоках (р. Партизанка, р. Фрикена), остальные – в среднем течении и эстуарной зоне реки.

Ведущими родами, отличающимися наибольшим количеством таксонов (от 9 и выше) являлись Nitzschia (39 видовых и внутривидовых таксонов), Navicula (25), Pinnularia (16), Gomphonema (13), Cymbella (9) и Surirella (9). Анализ видового состава перифитона показал, что лидирующее положение родов Navicula и Nitzschia характерно для всех исследуемых участков реки. Роды Pinnularia, Gomphonema наиболее разнообразны в притоках р. Лютога, Cymbella и Surirella – в среднем течении и эстуарной зоне. Общими постоянными компонентами перифитона всех исследуемых участков реки являлись Nitzschia fonticola, N. palea, N. paleacea, Planothidium ellipticum, P. rostratum, Cocconeis placentula var. euglypta, Gomphonema clavatum, G. parvulum, Hannaea arcus, H. arcus f. recta, Ulnaria inaequalis.

Для внутренних водоемов Сахалинской области впервые указаны 34 вида и внутривидовых таксона микроводорослей и цианобактерий (в приложении они помечены звездочками).

Количество видов на разных участках реки варьировало от 118 до 209. По мере удаления от эстуарной зоны к верховьям реки наблюдалось снижение общего количества видов за счет уменьшения разнообразия диатомовых водорослей (табл. 2), что закономерно для эстуариев [Хлебович, 1974].

Таблица 2. Количество видов и внутривидовых таксонов водорослей и цианобактерий перифитона на разных участках р. Лютога

Отделы	Эстуарная зона	Р. Партизанка	Среднее течение реки	Р. Фрикена
Cyanobacteria	5	5	5	6
Bacillariophyta	189	151	139	108
Cryptophyta	1	_	_	_
Charophyta	_	5	5	1
Chlorophyta	8	5	15	3
Miozoa	2	_	_	1
Ochrophyta	3	3	1	2
Cercozoa	1	_	_	_
Rhodophyta	_	2	_	_
Всего	209	171	165	121

Table 2. The number of species and intraspecific taxa of periphyton algae and cyanobacteria in the different parts of the Lutoga River basin

Комплекс доминирующих по численности видов сформирован 47 видами, что составляет 15 % от общего количества видов. Большинство видов, населяющих субстраты в р. Лютога, малочисленны. В доминирующем комплексе наиболее разнообразны представители Bacillariophyta (35 видов). За ними по убыванию следуют Cyanobacteria (6), Chlorophyta (5), Ochrophyta (2). Продолжительное время (более 5 мес.) роли единиц группового доминирования в перифитоне р. Лютога играли 10 видов: Diatoma elliptica, Encyonema minutum, Gomphonema olivaceum, Hannaea arcus f. recta, Melosira varians, Navicula viridula, Planothidium lanceolatum, P. ellipticum, Rhoicosphenia abbreviata, Tapinothrix varians.

На исследованных участках комплексы доминирующих видов включали от 17 до 25 видовых таксонов. Наименее представительным в этом отношении был верховой приток, р. Фрикена, наиболее – низовой, р. Партизанка. Общей чертой для всех участков являлось доминирование в весенне-летний период (с апреля по август) *Н. arcus* f. *recta* с содоминированием в эстуарной зоне *Navicula viridula*, на остальных водотоках – *Tapinothrix varians*. В р. Партизанка доминантный комплекс был расширен за счет Епсуопета тіпиtит, Planothidium lanceolatum, P. ellipticum, в среднем течении реки – Е. minutum, Gomphonema olivaceum. Одной из характерных особенностей в р. Партизанка являлось обильное развитие в мае при температуре воды 7 °С охрофитовой Hydrurus foetidus. С июня наблюдалось ее вытеснение представителями диатомовых, зеленых водорослей (Ulothrix zonata) и цианобактерий (Tapinothrix varians), а к сентябрю – ее полное исчезновение из сообщества. В осенне-зимний период (сентябрь-февраль) в среднем течении и р. Партизанка были обильны Melosira varians, в эстуарной зоне и р. Фрикена – Rhoicosphenia abbreviata (см. прил.). Важно отметить высокую плотность заселения в эстуарной зоне бентической диатомеи, олигогалоба, олигосапробионта – Diploneis elliptica. Последний развивался здесь на субстратах в заметном количестве практически круглый год. Кроме того, он был отмечен и в среднем течении реки, но численность и частота встречаемости его здесь были незначительны.

Частота встречаемости доминирующих видов в зависимости от скорости течения была различной. Диатомовые водоросли Melosira varians, Navicula viridula и Rhoicosphenia



Рис. 2. Встречаемость некоторых видов доминирующего комплекса при разных скоростях течения. 1 – Diatoma mesodon, 2 – Hannae arcus f. recta, 3 – Planothidium lanceolatum, 4 – Planothidium ellipticum, 5 – Homoeothrix varians, 6 – Ulothrix zonata, 7 – Hydrurus foetidus, 8 – Melosira varians, 9 – Navicula viridula, 10 – Rhoicosphenia abbreviata.

Fig. 2. Occurrence of some dominant species at different flow rates. 1 – Diatoma mesodon, 2 – Hannae arcus f. recta, 3 – Planothidium lanceolatum, 4 – Planothidium ellipticum, 5 – Homoeothrix varians, 6 – Ulothrix zonata, 7 – Hydrurus foetidus, 8 – Melosira varians, 9 – Navicula viridula, 10 – Rhoicosphenia abbreviata.

abbreviata характерны в равной степени как для медленнотекущих участков при скоростях менее 0.2 м/с, так и для участков со скоростями 0.3-0.6 м/с. Частота встречаемости таких видов, как Diploneis mesodon, Hannaea arcus f. recta, Planothidium lanceolatum, P. ellipticum, была одинакова и на медленнотекущих, и на быстротекущих участках. Явных предпочтений этих видов определенному скоростному режиму реки нами не отмечено. Колониальные Tapinothrix varians и Ulothrix zonata предпочитали участки со скоростями течения 0.3–0.6 м/с, что сопоставимо с результатами других исследователей [Stevenson, 1996, цит. по: Комулайнен, 2005]. Высокие скорости течения предпочитала и охрофитовая Hydrurus foetidus. Часто она встречалась при скорости более 0.8 м/с. Наши данные подтверждают, что максимальная биомасса для альгоценозов, сформированных диатомеями, наблюдается при скорости течения 0.1-0.2 м/с, а для группировок нитчатых водорослей – при 0.3–0.6 м/с. [Poff et al., 1993, цит. по: Комулайнен, 2005]. При высоких скоростях течения (>0.5 м/с) успешно развиваются только виды, способные выдерживать значительное механическое воздействие [Комулайнен, 2005].

При изучении фитоперифитона по отношению к солености для разных участков исследования отмечены некоторые вариации в соотношении группировок (рис. 3). Тем не менее ведущее место на всех участках занимали пресноводные виды (49-62 % от общего количества видов). Многие из них создавали значительные концентрации, входили в доминантный комплекс, а такие виды, как Наппае arcus, H. arcus f. recta, Navicula lanceolata, Planothidium ellipticum, P. lanceolatum, являлись постоянными компонентами перифитонного комплекса всех участков реки. Представители морской флоры спорадически были отмечены в эстуарной зоне (5 % от общего количества видов) и в р. Партизанка (1 %). Массовых скоплений они не образовывали. Существенный вклад в формирование сообществ фитоперифитона вносят виды смешанных групп: пресноводно-солоноватоводные и солоноватоводно-морские. Последние наиболее разнообразны были в эстуарной зоне (18 видов, 9 % от общего количества видов), в то время как в среднем течении реки их количество ограничено пятью видами, в р. Партизанка – двумя, в р. Фрикена – одним. Доля пресноводно-солоноватоводных видов на всех участках была примерно одинакова (24-25 %). В составе группы солоноватоводных видов на разных участках отмечено от 2 до 20 видов. Наиболее представительной она была в эстуарной зоне (20 видов, 10 %) и в р. Партизанка (11 видов, 6 %). Единично в отдельные периоды солоноватоводные виды отмечены в р. Фрикена и среднем течении реки. В формировании количественных показателей заметной роли не играли.

По отношению к местообитанию более 60 % от общего количества обнаруженных видов на разных участках составляли бентосные формы. Их богатство формировалось преимущественно за счет диатомей порядка Bacillariales (см. прил.). Доля планктонно-бентосных видов варьировала в пределах 20–25 %, планктонных – 6–14 %. Наибольшее долевое участие в формировании видового списка принимали бентосные виды в р. Партизанка, планктонно-бентосные – в среднем течении реки, планктонные – в эстуарной зоне (рис. 4).

Исходя из результатов географического анализа флоры, в экосистеме р. Лютога повсюду превалировали космополитные виды (75–77%), что характерно для речных экосистем разных географических областей [Беляева, 2011]. Среди них общие для всех исследуемых водотоков 45 видов, в доминантный комплекс входят 34. Доля остальных видов с известной географической приуроченностью не превышала 7% (рис. 5). Однако некоторые виды из этих групп являлись доминирующими. Это аркто-альпийские *Hannaea arcus, H. arcus* f. *recta*, аркто-бореальный *Odontidium mesodon* (см. прил.).



Рис. 3. Соотношение водорослей перифитона по группам солености. 1 – морские, 2 – солоноватоводно-морские, 3 – солоноватоводные, 4 – пресноводно-солоноватоводные, 5 – пресноводные, 6 – виды с неизвестной характеристикой.

Fig. 3. Ratio of periphyton algae by salinity groups. 1 – marine, 2 – brackish-water/marine, 3 – brackish-water, 4 – freshwater/brackish-water, 5 – freshwater, 6 – species with unknown characteristics. По отношению к активной реакции среды (pH) во всех водотоках по количеству таксонов преобладали алкалифилы (puc. 6). Второе место занимали водоросли, проявляющие индифферентные свойства к концентрации водородных ионов в воде, последнее – ацидофилы. Надо отметить, что ацидофилы, за счет разнообразия видов родов *Eunotia, Pinnularia, Tabellaria*, больше представлены в притоках р. Лютога (см. прил.).

На всех участках реки большинство видовиндикаторов (35–39 % от общего количества обнаруженных видов) относились к бета-мезосапробионтам (индикаторы умеренного загрязнения). Немалую долю (20–27 %) составляли



Рис. 4. Соотношение водорослей перифитона по местообитанию. 1 – планктонно-бентосные, 2 – бентосные, 3 – планктонные, 4 – виды с неизвестной характеристикой.

Fig. 4. Ratio of periphyton algae by habitat. 1 - planktonic/ benthic, 2 - benthic, 3 - planktonic, 4 - species with unknown characteristics.



Рис. 5. Соотношение водорослей перифитона по географической приуроченности. 1 – космополиты, 2 – арктоальпийские, 3 – аркто-бореальные, 4 – аркто-бореально-тропические, 5 – бореальные, 6 – северо-альпийские, 7 – виды с неизвестной характеристикой.

Fig. 5. The ratio of periphyton algae by geographic confinement. 1 - cosmopolitan, $2 - \arctan$, $3 - \arctan$, $3 - \arctan$, $3 - \arctan$, $4 - \arctan$ -arcto-boreal-tropical, 5 - boreal, 6 - north-alpine, 7 - species with unknown characteristics.

олигосапробионты – индикаторы слабого загрязнения. Далее следовали альфа-мезосапробионты – индикаторы сильного загрязнения (8–12 %) и ксеносапробионты – индикаторы чистых вод (3–5 %). Полисапробионты – индикаторы очень сильного загрязнения – составляли 0–1 %. Наибольшее долевое участие альфа-мезосапробионтов в формировании видового состава наблюдалось в эстуарной зоне и среднем течении реки, олигосапробионтов – в притоках (рис. 7).



Рис. 6. Соотношение водорослей перифитона по отношению к активной реакции среды. 1 – индифференты, 2 – алкалифилы + алкалибионты, 3 – ацидофилы + ацидобионты, 4 – виды с неизвестной характеристикой.

Fig. 6. Ratio of periphyton algae in relation to pH. 1 – indifferent, 2 – alkaliphiles + alkalibionts, 3 – acidophiles + acidobionts, 4 – species with unknown characteristics.



Рис. 7. Соотношение видов-индикаторов сапробности на исследуемых участках бассейна р. Лютога. 1 – ксеносапробионты, 2 – олигосапробионты, 3 – бета-мезосапробионты, 4 – альфа-мезосапробионты, 5 – полисапробионты, 6 – виды с неизвестной характеристикой.

Fig. 7. Ratio of saprobity indicator species in the study areas of the Lutoga River basin. 1 - xenosaprobionts, 2 - oligosaprobionts, 3 - beta-mezosaprobionts, 4 - alpha-mezosaprobionts, 5 - polysaprobionts, 6 - species with unknown characteristics.

Заключение

Река Лютога, как «лососевая» река, экологически значима для о. Сахалин, и для оценки ее экологического состояния необходимы представления о водной биоте. Нами выявлены сведения о видовом составе ее главного автотрофного компонента – фитоперифитона.

Альгофлора р. Лютога и водотоков ее бассейна характеризуется разнообразием видов. Всего обнаружено 303 вида и внутривидовых таксонов микроводоросей и цианобактерий из девяти отделов: Cyanobacteria, Bacillariophyta, Cryptophyta, Charophyta, Chlorophyta, Rhodoрнута, Міоzoa, Ochrophyta, Cercozoa. Впервые для внутренних водоемов Сахалинской области указываются 34 вида и внутривидовых таксона микроводорослей и цианобактерий. Основу альгофлоры составляют диатомовые, зеленые водоросли и цианобактерии. Среди семейств лидируют Bacillariaceae и Naviculaceae, родов – Nitzschia и Navicula. По количеству видов преобладают космополиты, пресноводные, бентосные формы, алкалифилы, бета-мезосапробионты. По мере удаления от эстуарной зоны к верховьям реки снижается количество видов, разнообразие географических группировок, планктонных форм, видов – альфа-мезосапробионтов.

Состав доминирующих видов обширен (47 видов), из них десять – Diatoma elliptica, Encyonema minutum, Gomphonema olivaceum, Hannaea arcus f. recta, Melosira varians, Navicula viridula, Planothidium lanceolatum, Planothidium ellipticum, Rhoicosphenia abbreviata, Tapinothrix varians – продолжительное время выступают в роли единиц группового доминирования в перифитоне р. Лютога. Для всех участков характерно преобладание в весеннелетний период Hannaea arcus f. recta, в осенне-зимний – Melosira varians и Rhoicosphenia abbreviata.

Сведения о таксономической и экологогеографической структуре фитоперифитона «лососевой» реки расширяют базу данных о видовом составе альгофлоры Сахалина. Полученные результаты послужат основой для проведения гидробиологических работ по оценке санитарно-биологического состояния, биоразнообразия водотоков Сахалинской области, каталогизации их альгофлор.

Список литературы

1. Беляева П.Г. **2011.** Структура фитоперифитонных сообществ в речных экосистемах (Обзор). Известия Пензенского гос. педагогического университета имени В. Г. Белинского. Естественные науки, 25: 484–492.

2. Естественная история Сахалина и Курильских островов. Водотоки острова Сахалин: жизнь в текучей воде. 2015. Авт: Лабай В.С., Живоглядова Л.А. Полтева А.В., Мотылькова И.В., Коновалова Н.В., Заварзин Д.С., Баранчук-Червонный Л.Н., Кордюков А.В., Даирова Д.С., Никитин В.Д. и др. Южно-Сахалинск: Сах. обл. краеведч. музей, 236 с.

3. Живоглядова Л.А., Лабай В.С., Даирова Д.С., Мотылькова И.В., Никитин В.Д., Полтева А.В., Галанина Е.В. **2016.** Структура донных сообществ малых рек южного Сахалина в летне-осенний период на примере притоков р. Лютога. *Известия ТИНРО*, 184(1): 178–185. https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-184-178-185

4. Жузе А.П., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова В.С. **1949.** Диатомовый анализ. Кн. 1. Л.: Госгеоиздат, 239 с.

5. Комулайнен С.Ф. **2003.** *Методические рекомендации по изучению фитоперифитона в малых реках.* Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 43 с.

6. Комулайнен С.Ф. **2005.** Структура и функционирование фитоперифитона в малых реках Восточной Фенноскандии: дис. ... д-ра биол. наук. СПб.: Зоол. ин-т РАН, 257 с.

7. Коновалова Н.В., Мотылькова И.В. **2008.** Микроперифитон р. Поронай (о. Сахалин). В кн.: *Пери*фитон и обрастание: теория и практика: тез. междунар. науч.-практ. конф. СПб., с. 50–51.

8. Коновалова Н.В., Мотылькова И.В. **2011а.** Фитоперифитон бассейна реки Новоселка. В кн.: Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях: Труды СахНИРО, т. 12: 119–130.

9. Коновалова Н.В., Мотылькова И.В. **20116.** Фитоперифитон нижнего течения р. Тымь в сентябре 2009 г. (о. Сахалин). В кн.: *Разнообразие почв и биоты северной и центральной Азии: материалы II междунар. науч. конф. Улан-Удэ (Россия), 20–25 июня 2011 г.*: в 3 т. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, т. 2: 194–195.

10. Лабай В.С., Живоглядова Л.А., Никитин В.Д., Коновалова Н.В., Мотылькова И.В. **2017.** Трофодинамика экосистемы ритрали «лососевой» реки южного Сахалина на примере реки Лютога. В кн.: *Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова*, вып. 7: 90–117.

11. Латковская Е.М., Никулина Т.В., Могильникова Т.А., Коренева Т.Г. **2014.** Материалы к изучению гидрохимических параметров и альгофлоры рек южной части о-ва Сахалин. В кн.: *Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова*, вып. 6: 380–392.

12. Макаревич П.Р. **2007.** Планктонные альгоценозы эстуарных экосистем. Баренцево, Карское и Азовское моря. М.: Наука, 222 с.

13. Медведева Л.А. **2013.** Первые результаты альгологического обследования реки Даги (о. Сахалин). В кн.: *Жизнь пресных вод.* Владивосток: Дальнаука, вып. 1: 38–48.

14. Медведева Л.А., Миски А.В. **2011.** Материалы к флоре пресноводных водорослей западного побережья острова Сахалин. В кн.: *Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова*, вып. 5: 346–359.

15. Медведева Л.А., Никулина Т.В. **2014.** *Каталог пресноводных водорослей юга Дальнего Востока России*. Владивосток: Дальнаука, 271 с.

16. Могильникова Т.А., Латковская Е.М., Никулина Т.В. **2013.** Пространственная изменчивость гидрохимических показателей и водорослевых сообществ на границе река-море. В кн.: *Жизнь пресных вод*. Владивосток: Дальнаука, вып. 1: 212–225.

17. Никитин В.Д., Метленков А.В., Прохоров А.П., Сафроненко В.А., Лукьянова Н.С., Галенко К.Г. **2013.** Видовой состав и сезонное распределение рыб в реке Лютога (по данным 2011–2012 годов). *Труды СахНИРО*, вып. 14: 55–95.

18. Никулина Т.В. **2005.** Диатомовые водоросли (Bacillariophyta) юга острова Сахалин. В кн.: *Растительный и животный мир острова Сахалин (материалы Международного Сахалинского проекта)*. Владивосток: Дальнаука, ч. 2: 8–20.

19. Никулина Т.В. **2009.** Структура альгосообществ и оценка качества воды рек Тымь и Поронай (о. Сахалин, Россия). В кн.: *Х Съезд Гидробиологического общества при РАН: тез. докл.* Владивосток: Дальнаука, с. 291–292.

20. Никулина Т.В. **2011.** Пространственная динамика перифитонных альгосообществ и изменение качества воды в бассейне р. Тымь (о-в Сахалин, Россия). В кн.: *Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова*, вып. 5: 395–410.

21. Протасов А.А. 1994. Пресноводный перифитон. Киев: Наукова думка, 307 с.

22. Хлебович В.В. 1974. Критическая соленость биологических процессов. Л.: Наука, 236 с.

23. Nikulina T.V. 2009. Diatoms of hot springs of Sakhalin Island (Far East, Russia). Phycologia, 48(4): 93.

24. Nikulina T.V. **2013.** Diatom flora of fresh and brackish water bodies of the Sakhalin Island (Far East, Russia). In: *Diatoms diversity and distribution, role in biotechnology and environmental impacts*. New York: Nova Science Publ., p. 35–86.

25. Nikulina T.V., Kociolek J.P. **2011.** Diatoms from hot springs from Kuril and Sakhalin Islands (Far East, Russia). In: *The Diatom World*. London, New York: Springer, p. 333–363. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1327-7 15

26. Poff N.L., Palmer M.A., Angermeier P.L., Vadas Jr.R.L., Hakenkamp C.C., Bely A., Arensburger P., Marthin A.P. **1993.** Size structure of metazoan community in Piedmont stream. *Oecologia*, 95(2): 202–209. https://doi.org/10.1007/bf00323491

27. Stevenson R.J. **1996**. An introduction of bentic algae ecology in freshwater bentic habitats. In: *Algal ecology. Freshwater bentic ecosystems*, p. 3–30. https://doi.org/10.1016/b978-012668450-6/50030-8

References

1. Belyaeva P.G. 2011. Structure of communities in phytoperiphyton river ecosystem (review). Izvestia Penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni V. G. Belinskogo, 25: 484–492. (In Russ.).

2. Estestvennaya istoriya Sakhalina i Kuril'skikh ostrovov. Vodotoki ostrova Sakhalin: zhizn'v tekuchei vode [Nature history of Sakhalin and Kuril Islands. Water streams of Sakhalin: life in a running water]. 2015. Authors: Labay V.S., Zhivoglyadova L.A., Polteva A.V., Motylkova I.V., Konovalova N.V., Zavarzin D.S., Baranchuk-Chervonyy L.N., Kordyukov A.V., Dairova D.S., Nikitin V.D. et al. Yuzhno-Sakhalinski: Sakhalinskiy oblastnoy kraevedchekiy muzey [Sakhalin Regional Museum], 236 p. (In Russ.).

3. Zhivoglyadova L.A., Labay V.S., Dairova D.S., Motylkova I.V., Nikitin V.D., Polteva A.V., Galanina E.V. **2016.** Structure of benthic communities in small rivers of southern Sakhalin in summer-autumn period, a case of the Lyutoga River tributaries. *Izvestiya TINRO*, 184(1): 178–185. (In Russ.). https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-184-178-185

4. Zhuze A.P., Proshkina-Lavrenko A.I., Sheshukova V.S. **1949.** *Diatomovyy analiz* [*Diatom analysis*]. Kn. 1. Leningrad: Gosgeoizdat, 239 p. (In Russ.).

5. Komulaynen S.F. **2003.** *Metodicheskie rekomendatsii po izucheniyu fitoperifitona v malykh rekakh* [*Methodological recommendations on studying phytoperiphyton in small rivers*]. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN [Karelian Research Center, RAS], 43 p. (In Russ.).

6. Komulaynen S.F. **2005.** Struktura i funktsionirovanie fitoperifitona v malykh rekakh Vostochnoy Fennoskandii [Structure and functioning of phytoperiphyton in small rivers of Eastern Fennoscandia]: [diss. ... doctor of Biology]. Saint Petersburg: Zoologicheskiy institut RAN [The Zoological Institute RAS], 257 p. (In Russ.).

7. Konovalova N.V., Motylkova I.V. **2008.** Periphytic microalgae of River Poronay (Island Sakhalin). In: *Perifiton i obrastanie: teoriya i praktika: tezisy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii.* Saint Petersburg, p. 50–51. (In Russ.).

8. Konovalova N.V., Motylkova I.V. **2011a.** Phytoperiphyton of the Novoselka River Basin. In: *Water life biology, resources status and condition of inhabitation in SakhalinKuril region and adjoining water areas: Trudy SakhNIRO* [*Transactions of Sakhalin Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography*], vol. 12: 119–130. (In Russ.).

9. Konovalova N.V., Motylkova I.V. **20116.** [Phytoperiphyton of the lower reach of Tym' River in September, 2009 (Sakhalin Island)]. In: *Biota and Soil Diversity of Northern and Central Asia: Proceedings of the 2nd Intern. Conf., Ulan-Ude (Russia), June 20–25, 2011*: in 3 vol. Ulan-Ude: BSC SB PAS Publ., vol. 2: 194–195. (In Russ.).

10. Labay V.S., Zhivoglyadova L.A, Nikitin V.D., Konovalova N.V., Motylkova I.V. **2017.** Trophodynamics of rhitral ecosystem of «salmon» river of Southern Sakhalin on the example of Lyutoga River. In: *Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings*, vol. 3: 90–117. (In Russ.).

11. Latkovskaya E.M., Nikulina T.V., Mogilnikova T.A., Koreneva T.G. **2014.** Materials for studying of hydrochemical parameters and algal flora of rivers from southern part of the Sakhalin Island. In: *Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings*, vol. 6: 380–392. (In Russ.).

12. Makarevich P.R. **2007.** *Planktonic algocenoses of ectuarial ecosystems: Barents, Kara and Azov Seas.* Moscow: Nauka, 222 p. (In Russ.).

13. Medvedeva L.A. **2013.** First results of algological study of Dagi River (Sakhalin Island). In: *Freshwater Life*. Vladivostok: Dal'nauka, vol. 1: 38–48. (In Russ.).

14. Medvedeva L.A., Miski A.V. **2011.** Materials on the flora of freshwater algae from western coast of Sakhalin Island. In: *Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings*, vol. 5: 346–359. (In Russ.).

15. Medvedeva L.A., Nikulina T.V. **2014.** *Catalogue of freshwater algae of the southern part of the Russian Far East.* Vladivostok: Dalnauka, 271 p. (In Russ.).

16. Mogilnikova T.A., Latkovskaya E. M., Nikulina T.V. **2013.** Spatial variability of hydrochemical parameters and algal communities at the boundary of a river-sea. In: *Freshwater Life*. Vladivostok: Dal'nauka, vol. 1: 212–225. (In Russ.).

17. Nikitin V.D., Metlenkov A.V., Prokhorov A.P., Safronenko V.A, Lukyanova N.S., Galenko K.G. **2013.** Species composition and seasonal distribution of fishes in the Lyutoga River (2011–2012). In: *Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin Kuril region and adjoining water areas: Trudy SakhNIRO* [*Transactions of Sakhalin Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography*], vol. 14: 55–95 (In Russ.).

18. Nikulina T.V. **2005.** Diatom algae (Bacillariophyta) from the south part of Sakhalin Island. In: *Flora and fauna of Sakhalin Island (Materials of International Sakhalin Island Project).* Vladivostok: Dalnauka, pt 2: 8–20. (In Russ.).

19. Nikulina T.V. **2009.** [Structure of algal communities and water quality assessment of the Tym' and Poronai (Sakhalin Island, Russia)]. In: *X S'ezd Gidrobiologicheskogo obshhestva pri RAN: tez. dokl. (20th Conf. of the Hydrobiological society by RAS): abstrs.* Vladivostok: Dal'nauka, p. 291–292. (In Russ.).

20. Nikulina T.V. **2011.** Spatial dynamics of periphyton algal communities and change of water quality in the Tym River basin (Sakhalin Island, Russia). In: *Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings*, vol. 5: 395–410. (In Russ.).

21. Protasov A.A. 1994. Presnovodnyi perifiton [Freshwater periphyton]. Kiev: Naukova dumka, 307 p.

22. Khlebovich V.V. 1974. The critical salinity of biological processes. Leningrad: Nauka, 236 p. (In Russ.).

23. Nikulina T.V. 2009. Diatoms of hot springs of Sakhalin Island (Far East, Russia). Phycologia, 48(4): 93.

24. Nikulina T.V. **2013.** Diatom flora of fresh and brackish water bodies of the Sakhalin Island (Far East, Russia). In: *Diatoms diversity and distribution, role in biotechnology and environmental impacts*. New York: Nova Science Publ., p. 35–86.

25. Nikulina T.V., Kociolek J.P. **2011.** Diatoms from hot springs from Kuril and Sakhalin Islands (Far East, Russia). In: *The Diatom World*. London, New York: Springer, p. 333–363. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1327-7 15

26. Poff N.L., Palmer M.A., Angermeier P.L., Vadas Jr.R.L., Hakenkamp C.C., Bely A., Arensburger P., Marthin A.P. **1993.** Size structure of metazoan community in Piedmont stream. *Oecologia*, 95(2): 202–209. https://doi.org/10.1007/bf00323491

27. Stevenson R.J. **1996.** An introduction of bentic algae ecology in freshwater bentic habitats. In: *Algal ecology. Freshwater bentic ecosystems*, p. 3–30. https://doi.org/10.1016/b978-012668450-6/50030-8

AHH Ann	ютированный список водорослей и циано otated list of periphyton algae and cyanobac	бактерий перифитона teria of the Lutoga Rive	бассейна р. Лютога в фе r basin in February–Dece	врале-декабре 2011 :mber 2011	Ľ					
Å	E		Исследуемый водоток бас	сейна р. Лютога				ХХЄ		
п/п	1 аксон	1	2	3	4	a	9	В	Г	Д
	Empire Eukaryota Chatton Kingdom Chromista Cavalier-Smith Phylum Bacillariophyta Karsten Class Bacillariophyceae Haeckel Order Bacillariales Hendey Family Bacillariaceae Ehrenberg									
	Genus Bacillaria J.F.Gmelin									
1	B. paxillifera (O.F.Müller) T.Marsson «d»	II–XII (VI)	I	IIIA	I	П-Б	К	CM	ЧЛ	0
7	Genus Cylindrotheca Rabenhorst C. closterium (Ehrenberg) Reimann & J.C.Lewin	II, VIII, XI	I	I	I	ш	х	CM	ЧЛ	ъ
	Genus Hantzschia Grunow									
Э	H. amphioxys (Ehrenberg) Grunow «d»	I, IV, VI, X–XII	XII-V, VII-VIII (I)	I, IV–IX, XII	I-IV, VI-VIII	П-Б	Х	П	$M_{\rm H}$	б
	Genus Nitzschia Hassall									
4	N. acicularis (Kützing) W.Smith	IX	I	ΝП	I	Ш	Х	Ш	ЧЛ	ъ
5	N. brevissima Grunow	I, IV	IV, VI–VIII	II-V, XII	IV, VII–VIII	р	Х	U	$M_{\rm H}$	б
9	N. capitellata Hustedt «d»	VI, VIII	XII, VI, X–XI (XII)	I–II, XII	VI, X–XI	Ъ	Х	IIC	ЧЛ	α-ρ
7	N. clausii Hantzsch	I, IV–XII	V, VII–XI	V, VIII–IX, XII	II–IV, IX	Ъ	Ч	C	ЧЛ	α
∞	N. commutata Grunow	IV-V, VII-VIII, XI	ΠЛ	IV	I	р	Х	C	ЧЛ	
6	N. commutatoides Lange-Bertalot	VI, VIII, XI	ΠЛ	VIII-IIX	I	Ъ		П	II	
10	N. dissipata (Kützing) Rabenhorst	II–IX, XI	XII-II, VI-VIII, IX-XI	IIX-I	I-V, VII-VIII	р	Х	Ш	ЧЛ	б
11	N. dubia W.Smith	II-VII, X-XII	Ι	I	I	р	Х	U	Ин	β-α
12	*N. fasciculata (Grunow) Grunow	IX	I	I	I	Ъ	Х	U	ЧЛ	
13	N. filiformis (W.Smith) Van Heurck	IX-IIA	I	IX-XI	I	р	Х	C	Ч	σ
14	N. fonticola (Grunow) Grunow «d»	I, IV–XII (V, XII)	XII-XI (XII)	IIX-I	IX-I	Ъ	Х	П	ЧЛ	0-β
15	N. frustulum (Kützing) Grunow	I–II, IV, VIII–IX, XII	I	NII	NII	Ъ	Х	IIC	ЧЛ	В
16	*N. graciliformis Lange-Bertalot & Simonsen	VIII-IIV	I	VIII-X	I	II	Ш	Ш	II	Ш
17	N. gracilis Hantzsch	IV-V, VII-IX, XI	VII-VIII	II-V, VII-XI	I,X	П-Б	Х	П	Ин	о-в
18	*N. holsatica Hustedt	Ι	Ι	Х	I	П	II	П	$M_{\rm H}$	3

Экология / Есогоду

Геосистемы переходных зон, 2021, 5(4)

Å	Таксон		2	3	4	а	૭	в	ч	ц	
19	N. lanceolata W.Smith	II, IV–V, VII–IX, XI–XII	Ι	IV-XI	I	Ъ	Х	U	Ч	II	
20	*N. incerta (Grunow) M.Peragallo	I, IX, XII	I	Ι	I	р	Х	U	II	II	
21	N. linearis (C.Agardh) W.Smith	I-V, VII-IX, XI-XII	XII-II, VII-XI	I-IV, VI-XII	V-X	Ъ	X		ΓГ	۳	
23	N. lorenziana Grunow	II, IV, IX–XII	I	I	I	р	Х	C			
24	N. nana Grunow	II, V–IX, XI	I	NIII	I	Ъ		П		α-β	
25	N. obtusa W.Smith	I	ΝI	I	I	Ъ	Х	C	ЦΑ		
26	N. palea (Kützing) W.Smith «d»	IIX-I	XII-V, VII-XI (IV)	IIX-I	II-V, VII-X (IV-V)	П-Б	Х	IIC	Ин	б	
27	<i>N. palea</i> var. <i>capitata</i> Wislouch & Poretsky	I	XII-I	I	I	П-Б	Х	ПС	Ш	Ш	
28	N. paleacea (Grunow) Grunow «d»	IIX-I	XII-IV, VI, VIII, X–XI	I-XII (XI)	V, X	П-Б	Х	Ш	ΓЧ	ъ	
29	N. recta Hantzsch ex Rabenhorst	VII, IX, XI	I	IV, VIII, X	I	П-Б	Х	Ш	ΓЧ	β	
30	N. scalpelliformis Grunow	IIX–II	I, IV, VII	IV, VII–VIII	VI–IX	р	Х	C	ΓЧ	β	
31	N. sigma (Kützing) W.Smith	I-V, VIII-XII	VII-VIII, X	I–IV, VII–XII	I	П-Б	Х	C	ΓЧ	α	
32	*N. sigmoidea (Nitzsch) W.Smith	ΝII	I	Ι	I	П-Б	Х	IIC	ΓЧ	β-α	
33	Nitzschia species	I	IV	I	I	II	II	Ш	11	II	
34	*N. terrestris (J.B.Petersen) Hustedt	IX-IV	VII-VIII	IV, VI, VIII	Х	Б	Ъ	IIC	ЦΑ		
35	N. umbonata (Ehrenberg) Lange-Bertalot	II, IX	XII-I	Ι	I	р	Х	Ш	Ин	ρ	
36	N. vermicularis (Kützing) Hantzsch	II, IV, VIII–XII	VII, X	I, IV, IX	XI	Ъ	Х	IIC	ЦΑ		
	Genus Tryblionella W.Smith										
37	T. angustata W.Smith	I	IIIA	Ι	I	Ъ	Ч	ПС	ΓЧ	α	
38	T. debilis Arnott ex O'Meara	VII-VIII, IX-X	I	Ι	I	р	II	ПС	Ч	б	
39	*T. hantzschiana Grunow	ΙΛ	I	Ι	I	р	Х	ПС	Ч	ъ	
40	T. levidensis W.Smith	I-V, VII-XII	I	II, IV, VIII–X	I	П-Б	р	ПС	Ч	β	
41	T. victoriae Grunow	VIII	I	I	I	р	К	ПC	Ч	α	
	Order Cocconeidales E.J.Cox										
	Family Achnanthidiaceae D.G.Mann										
	Genus Achnanthidium Kützing										
42	A. minutissimum (Kützing) Czarnecki	VI-XI	IX, I, II, IV– IX	VI-XII	I–II, V–VI, VIII	Р	K	П	Ин	β	
	Genus Gogorevia M.Kulikovskiy, A.Glushchenko, A.Maltsev & J.P.Kociolek										
43	<i>G. exilis</i> (Kützing) Kulikovskiy & Kociolek	IV-VI, VIII-XI	II, V	Λ	I	р	Х	Ш	ЧЛ	β	
	Genus <i>Planothidium</i> Round & L.Bukhtiyarova										
4	P. delicatulum (Kützing) Round & Bukhtiyarova	N-XII	VIII	IV–IX, XII	I, IV, VIII–XI	р	Х	Ш	ЧЛ	Ш	

Экология / Есоьоду

Геосистемы переходных зон, 2021, 5(4)

Š	Таксон		2	3	4	а	9	в	L	Ц
45	P. ellipticum (Cleve) M.B.Edlund «d»	I-XII (IV)	XII-XI (I-IV, XII-XIII)	I–XII (II)	I-XII (II)	р	II	Ш	II	II
46	<i>P. haynaldii</i> (Schaarschmidt) Lange-Bertalot	I	XII-I, IV	I	I	П-Б	К	П	Ч	β-c
47	<i>P. lanceolatum</i> (Brébisson ex Kützing) Lange-Bertalot «d»	I-XII	XII-XI (I-IV, X-XII)	ILXII	I-XII (I-II)	П-Б	×		ГΥ	β-6
48	*P. lanceolatum f. ventricosum (Hustedt) Buktiyarova	I	I–X	I	I–II, V–IX	II-Б	К	Ш	Ш	II
49	P. rostratum (Østrup) Lange-Bertalot	IV, VI, IX–XI	XII–XI	IV-VII, IX-X	I-XII	Б	К	ПС	Ч	
	Family Cocconeidaceae Kützing									
	Genus Cocconeis Ehrenberg									
50	C. pediculus Ehrenberg	I	Ι	I	Ι	Ъ	Ч	ПС	Ч	β
51	C. placentula Ehrenberg	I-II, VIII-IX, XI-XII	V, X	II, VII–XII	I–IV	Ъ	Х	ПC	Ч	θ
52	C. placentula var. euglypta (Ehrenberg) Cleve «d»	(IIII) IIX-I	XII-VI, VIII-XI	I-XII (VIII-IX)	I, V–XII	р	Х	IIC	Ч	β
53	C. scutellum Ehrenberg	I–II, VIII–X	NII	I	NIII	р	Х	CM	Ч	II
54	Cocconeis Ehrenberg species	Ι	Х	I	I	Ъ	II	11	II	II
	Order Cymbellales D.G.Mann									
	Family Anomoeoneidaceae D.G.Mann									
	Genus Pauliella F.E.Round & Basson									
55	P. taeniata (Grunow) Round & Basson	IV	I	Ι	1	П	ΕA	CM	Ш	Ш
	Family Cymbellaceae Kützing									
	Genus Brebissonia Grunow									
56	B. lanceolata (C.Agardh) Mahoney & Reimer	I	I	ΠΛ	I	Р	Б	CM	ГЧ	β
	Genus Cymbella C.Agardh									
57	C. affinis Kützing	IΛ	VII-VIII, X	Ι	Ι	Ъ	Ъ	П	Ч	0-B
58	C. aspera (Ehrenberg) Cleve	IX–XI	I	XI	VII-VIII	Ъ	Ч	П	Ч	0
59	C. cistula (Ehrenberg) O.Kirchner	I, VII–VIII, XI	ΠΛ	I–II, XII	I	Ъ	Ч	П	Ч	0- β
60	C. cymbiformis C.Agardh	Π	I	Ι	I	Ъ	Ч	П	Ин	0
61	C. helvetica Kützing	I	Π	Ι	I, IV-V, IX-X	р	Х	П	Ч	0
62	C. lanceolata C.Agardh	Ι	ΝП	Ι	VII-VIII	Ъ	Ч	П	Ч	β
63	C. neocistula Krammer	II–VI, X	I	II–IV, IX–XI	I	II	II	П	II	II
64	C. tumida (Brébisson) van Heurck	I, VI, XI–XII	I	I-V, IX-XII	NIII	р	Х	П	Ч	0-β
65	C. turgidula Grunow «d»	I-XII	IV, X	I-XII (IX-XI)	I	Б	Х	ПС	Ш	Ш
	Genus Cymbopleura (Krammer) Krammer									
Рипорой соотер и околого	FEOEDA & WUEOKA & VADA KTEDUOTUKA	AUTORERIA ELOOFĂULA E	DIOTOTA (O. CANADINI)							
---------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------							
DNTORON COCIAR N 3KOIIOLO	ΙΕΟΙ ΡΑΨИЧЕСКАЯ ΧΑΡΑΚΙΕΡИСΙИКА	ΨΗΤΟΠΕΡΝΨΗΤΟΗΑ ΒΑCCENHA Η								

Å	Таксон	1	2	3	4	а	9	в	г	ц	
66	*C. comperei C.Cocquyt & R.Jahn	Ι	ПЛ	Ι	I	II-B	II	П	Ч		
67	<i>C. amphicephala</i> (Nägeli ex Kützing) Krammer	I	I	I	I, IV	П-Б	Х	П	Ин	0	
68	<i>C. naviculiformis</i> (Auerswald ex Heiberg) Krammer	I	NI-VIII	IX	I	Б	K	Ш	Ин	о-β	
	Genus Didymosphenia Mart.Schmidt										
69	D. geminata (Lyngbye) Mart.Schmidt	II, IV, XI	I	I-II, V, IX-XII	VIII, XI	р	р	П	Ин	0	
	Family Cymbellales incertae sedis										
	Genus Gomphonella Rabenhorst										
70	G. olivacea (Hornemann) Rabenhorst «d»	I-XII	XII–XI (V)	I-V, VII-XII (IV-VIII)	I-XII (VII)	Б	К	ПС	Ч	β	
	Family Gomphonemataceae Kützing										
	Genus Encyonema Kützing										
71	E. caespitosum Kützing	I, V, VII–IX, XI–XII	V, VII–VIII	N-VIII	Ν	Ъ	Ч	П	II	β-α	
72	E. elginense (Krammer) D.G.Mann	V-VI	V, IX	IV	Ι	Ъ	c-a	П	II		
73	E. minutum (Hilse) D.G.Mann «d»	IIX-I	IX–IIX	I-XII (I-II, V-VIII, XII)	I-XII (V, VIII-IX)	Ъ	Ч	П	Ин	о-В	
74	E. silesiacum (Bleisch) D.G.Mann «d»	IIX-I	IX–IIX	(IIIA) IIX–I	(IIIV) IIX–I	Ъ	Х	П	Ин	ъ	
75	Encyonema Kützing species	I	Π	I, VI–VII	I, VII, XII	р	II		II		
	Genus Gomphonema Ehrenberg										
76	G. angustatum (Kützing) Rabenhorst «d»	IX-II	IX-IIX	(IIIA) IX–II	I-X	Ъ	Х	П	Ч	β	
LL	G. angustum C.Agardh	Ι	I	Ι	Ι	Ъ	Ъ	П	Ч	0	
78	G. clavatum Ehrenberg	II, IV, IX, XI–XII	XII, II, V–VIII, X	I-V, VII-XII	I-II, V–XII	Ъ	Х	ПС	Ин	0	
79	G. constrictum Ehrenberg	Ι	NIIV	Ι	ПЛ	Ъ	Ч	П	Ч	β	
80	G. coronatum Ehrenberg	Ν	ПЛ	Х	Ι	Ъ	Х	П	Ч	β	
81	G. gracile Ehrenberg	II, VIII–IX, XII	XII, V–IX	XI	VIII-X	Ъ	Ч	П	Ин	0	
82	*G. grunowii R.M.Patrick & Reimer	VI, VIII–X	I	II, VII–XII	I	Ъ	Ъ	П	Ч	β	
83	G. parvulum (Kützing) Kützing	IIX-I	XII–XI	I-V, VII-XII	IX-I	Ъ	Х	П	Ин	β-α	
84	<i>G. productum</i> (Grunow) Lange-Bertalot & Reichardt «d»	IV, VIII	XII-VII, IX-XI (IV)	VI, VIII–XI	I, IV–V, VII–X	Ъ	К	Ш	Ч	β	
85	G. truncatum Ehrenberg	I, VI, VIII, XII	XII, II–V, IX	I-II, VII-VIII, IX-X, XII	I–IX, XI	Ъ	Ч	П	Ч	β	
86	G. ventricosum W.Gregory	V, VIII–IX	I, VIII	II, IV, VII–VIII, IX, X	I, VII–VIII	Ъ	c-a	П	II	0	
87	G. augur Ehrenberg	Ι	NIIV	Ι	Ι	Ъ	a-a	П	Ин	β	
88	*G. gautieri (Van Heurck) Lange-Bertalot & Metzeltin	I		I	Ι	Б	Х	П	Ч	β	
	Genus Placoneis Mereschkowsky										
89	*P. placentula var. rostrata (Mayer) N.A.Andresen, Stoermer & R.G.Kreis, Jr.	Ι	I	NIII	I	Б	К	П	ĿЧ		

Экология / Есоьоду

ſ										
Nē	Таксон	1	2	3	4	а	9	В	Г	д
	Genus Reimeria Kociolek & Stoermer									
90	R. sinuata (W.Gregory) Kociolek & Stoermer «d»	IIX-I	(VI) IX-IIX	(XI-IIIA) IIX-I	(II-II) IIX-I	П-Б	К	П	Ин	β
91	R. sinuata f. antiqua (Grunow) Kociolek & Stoermer	I	I	IIIA	Π	II-B	Х	П	Ш	Ш
	Family Rhoicospheniaceae Topachevs'kyj & Oksiyuk									
	Genus Rhoicosphenia Grunow									
92	<i>R. abbreviata</i> (C.Agardh) Lange-Bertalot «d»	I-XII (I-II, V, VIII-XII)	XII-XI (I-II, VIII-IX)	I-XII (II, IV, VIII-IX)	I-XII (I-II, VIII-XII)	ы	ABT	ПС	ГΥ	β
	Order Eunotiales P.C.Silva									
	Family Eunotiaceae Kützing									
	Genus Eunotia Ehrenberg									
93	<i>E. exigua</i> (Brébisson ex Kützing) Rabenhorst	I	I	I	Λ	ы	Х	П	Ац	0
94	E. minor (Kützing) Grunow	Ι	I, VI, VIII–IX	I	I	ы	Х	П	ЧЦ	0
95	E. monodon Ehrenberg	ΛI	I	Ι	I	Ъ	Х	П	Ац	0
96	E. pectinalis (Kützing) Rabenhorst	Ν	I	Ν	I	Ъ	Х	Ш	ЧЦ	0
97	E. praerupta Ehrenberg	I, IV	ΝП	I	Ι	Б	c-a	П	Ац	0
	Order Fragilariales P.C.Silva									
	Family Fragilariaceae Kützing									
	Genus Fragilaria Lyngbye									
98	F. vaucheriae (Kützing) J.B.Petersen «d»	V-XI (X)	I	VI–XI	I	II-B	Х	П	Ч	β-α
66	F. capucina Desmazières	I	I	IV	I	Ш	Ч	ПС	$M_{\rm H}$	β
100	F. crotonensis Kitton	IX-XI	VIII, X	I	I	П	Х	Ш	Ч	о-В
101	F. rumpens (Kützing) G.W.F.Carlson	I	Ι	I	I	II-B	К	П	$M_{\rm H}$	0-β
	Genus <i>Fragilariforma</i> D.M.Williams & Round									
102	F. mesolepta (Hustedt) Kharitonov	IV-V	I	II-V	I	П	Х	П	Ч	II
103	<i>F. virescens</i> (Ralfs) D.M.Williams & Round	XI	I	Π	I	II-Б	K	П	Ин	0
	Genus Odontidium Kützing									
104	O. mesodon (Kützing) Kützing«d»	IIX-I	(IV-VI) IX-IIX	I-XII (VI)	I-XII (V)	р	р	Ш	Ч	×
105	O. hyemale (Roth) Kützing	VII–X, XII	VII, X	V-VI, XI	I	Ъ	Х	П	Ч	0
106	O. anceps (Ehrenberg) Ralfs	II, VI	VI–IX	VII-VIII	IV	Ъ	А	н	Ш	0

										ſ
Å	Таксон	1	2	3	4	а	9	в	Г	ц
	Family Staurosiraceae Medlin									
	Genus Pseudostaurosira D.M.Williams & Round									
107	7 P. parasitica (W.Smith) Morales	Ι	Ι	XI	Ι	Ш	K	Ш	ЧЛ	β
	Genus Staurosirella D.M.Wiliams & Round									
108	8 <i>S. martyi</i> (Héribaud) E.A.Morales & K.M.Manoylov	I	I	I	ПЛ	Ъ	П	Ш	Ш	
109) S. pinnata (Ehrenberg) D.M.Williams & Round	I	ΠΛ	I	I	П-Б	К	ПС	ЦАЛ	β
	Order Licmophorales Round									
	Family Ulnariaceae E.J.Cox									
	Genus <i>Ctenophora</i> (Grunow) D.M.Williams & Round									
110) <i>C. pulchella</i> (Ralfs ex Kützing) D.M.Williams & Round	I	I	Х	I	П-Б	Х	ПС	ЦА	σ
	Genus Hannaea R.M.Patrick									
111	H. arcus (Ehrenberg) R.M.Patrick «d»	I-XII (I)	II-VIII, XI (IV)	IIX-I	I-XII (IV, VI-VII)	ß	a-a	Π	ЧЛ	×
112	? H. arcus f. recta (Cleve) Foged «d»	I-XII (V-X)	(IX-IIX) IX-IIX	I-XII (I-VIII, XI-XII)	I-XII (IV-VII, IX, XI)	ъ	a-a	Ш	ЧЛ	×
113	H. arcus var. amphioxys (Rabenhorst) R.M.Patrick	V, VIII–X	Ι	Ι	V, XI	Б	a-a	Ч	ЧЛ	х
	Genus Tabularia (Kützing) D.M.Williams & Round									
114	4 T. fasciculata (C.Agardh) D.M.Williams & Round	VIII–IX, XI	I	VI, IX–XI	I	П-Б	КI	ICM	ЧЛ	σ
	Genus Ulnaria (Kutzing) Compère									
115	U. ulna (Nitzsch) Compère	I	XII, I, VII	Π	I	II-Б	Х	Π	Ин	В
116	U. <i>amphirhynchus</i> (Ehrenberg) Compère & Bukhtiyarova	Ι	IX-IIA	I-II, VII-X, XII	I, IV–XI	II-Б	Х	Ш	Ш	
117	⁷ U. inaequalis (H. Kobayasi) M.Idei «d»	IIX-I	XII-XI (XI)	I, IV–XII (IX)	ILX-I	р		Ш		
118	8 U. oxyrhynchus (Kützing) M.Aboal	II–XI	I	II–XI	I	П-Б	К	Π	ЧЛ	α
	Order Mastogloiales D.G.Mann									
	Family Achnanthaceae Kützing									
	Genus Achnanthes Bory									
119	A. adnata Bory	II, VII–XI	I	I	I	Ъ	К	CM	ЧЛ	β
	Family Mastogloiaceae Mereschkowsky									

$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
4 a 6 B r VII-VIII E K II M_H I E E K II M_H I E B a-a II M_H - E a-a II M_H M_H - E B A M_H M_H - E B M M_H M_H I I M M M_H M_H I I K II M_H M_H I I I I M_H II II I
a 6 B Γ B K II IH B K II IH B = II AII B a-a II AII B B II AII B B II AII B K C $= B K IIC IH B K IIC IH B C-a II AII B C II AII B K IIC IH B C III AII B C III AII B C III AIII B $
6 B r K II MH = II MH = II AU a-a II AU b II AU B II AU B II AU B II AU E II AU E II AU E II AU K IC II K IC II K II AU E = = K IIC IIH K IIC IIH K IIC IIH E II = E II AU
B I II II II II II Au III Au III Au III Au III Au
Г Ин Ал Ал = = = = = Ма Ин = = = =

										ſ
Š	Таксон	1	2	3	4	а	9	в	L	ц
135	C. silicula var. truncata (Kützing) Meister	Ι	VII, VIII, IX, X	Ι	IX	Ъ	Х	ПС	ЧЛ	0-β
136	C. ventricosa var. truncatula (Grunow) Meister	XII	Ι	1	Ι	Ъ	Х	ПС	Ч	o-β
	Genus Gyrosigma Hassall									
137	G. acuminatum (Kützing) Rabenhorst	I, V, X	Х	I	VI, X	II-Б	Х	П	Ч	В
138	G. balticum (Ehrenberg) Rabenhorst	VIII-X	I	I	I	Ъ	Х	CM	Ч	
139	G. distortum (W.Smith) J.W.Griffith & Henfrey	Λ	Ι	I	Ι	Ъ	Ш	U	ЧЛ	Ш
140	G. obscurum (W.Smith) J.W.Griffith & Henfrey	Π	Ι	1	Ι	Ъ	TБA	М	Ш	II
141	G. strigilis (W.Smith) J.W.Griffin & Henfrey	Х	I	I	I	Ъ	Х	U	Ч	
142	Gyrosigma Hassall species	Ι	I	Х	I	II	Ш	=	Ш	
	Genus <i>Hippodonta</i> Lange-Bertalot, Witkowski & Metzeltin									
143	<i>H. capitata</i> (Ehrenberg) Lange-Bertalot, Metzeltin & Witkowski	II, V–VII, IX, XI	II-VIII, X-XI	V, VII, IX	Ι	Ъ	К	П	ЧЛ	ъ
144	<i>H. hungarica</i> (Grunow) Lange-Bertalot, Metzeltin & Witkowski	V, VIII	Ι	VII-IX	I	Б	Х	Ш	ЧЛ	В
	Genus Navicula Bory									
145	N. phyllepta Kützing	IV-V	XII-I	Λ	Ι	Ъ	Х	ПС	II	β-α
146	N. reinhardtii (Grunow) Grunow	П	Ι	Ι	Ι	Ъ	Х	ПC	Ч	0-β
147	*N. cancellata Donkin	I, VIII–IX	IX	I	I	Ъ	AB	М	II	
148	N. capitatoradiata H.Germain ex Gasse «d»	(VI) IIX-I	XII-V, VII-XI (II)	I-XII (II, IV)	IX-I	Ъ	Х	ПС	Ч	β-α
149	N. cari Ehrenberg	XII	I	I	I	ъ	Х	П	Ч	β-α
150	N. cincta Pantocsek	Π	Ι	I	I	Ъ	Х	ПC	Ч	β-α
151	N. cryptocephala Kützing	IIX-I	Ι	I–IV, VI–IX	I–II, VI–XI	П-Б	Ч	ПС	Ч	α
152	N. cryptotenella Lange-Bertalot «d»	(IIX-IX) IIX-I	XII-I, IV, VII-X	IIX-I	Ι	Ъ	Ч	П	Ч	β
153	N. gregaria Donkin	I	XII-XI	I	IX-I	Ъ	Ч	U	Ч	β-α
154	*N. grevilleana Hendey	VIII	I	I	I	Ъ	AB	М		
155	N. lanceolata Ehrenberg «d»	I-XII (II-VII, X)	I (I)	I-XII (I-II, IV, XI-XII)	I, VI (VI)	Ъ	Ч	П	Ч	α
156	N. menisculus Schumann	VI–XI	II, VI–VIII, X–XI	VI-VII, IX	I, VI–VIII	Ъ	Ч	ПС	Ч	β-α
157	N. peregrina (Ehrenberg) Kützing	VII-VIII	Ι	NII	I	Ъ	Х	CM	Ч	
158	N. radiosa Kützing	IV-XII	XII-II, VII-VIII, X-XI	IIX-I	I, IV, VIII	Ъ	Х	ПС	Ин	β
159	N. rhynchocephala Kützing	IIX–II	I	I, VI–IX	I	Ъ	Х	ПС	Ч	β-α
160	*N. rhynchotella Lange-Bertalot	I	I–II, V–IX	I	IV, VI, VIII–X	Б		ПС	11	

№ Таксон	-1	2	3	4	а	9	в	ц	ц
161 N. salinarum Grunow	IIA	I	I	I	Ъ	Х	ПС	$M_{\rm H}$	ß
162 N. salinicola Hustedt	XII	I	I	I	р	II	CM	II	
163 N. slesvicensis Grunow «d»	ILXII	XII, IV–XI (XI)	I-V, VII-XII	II–IX	ы	Х	ПС	Ч	β
164 Navicula species «d»	V-VI, VIII-XII (X)	II, V–VII	II, XI	IIV-VI	II	II	II	II	II
165 N. transitans Cleve	I, IV	I	I	I	Ъ	Ab	Σ	II	II
166 N. tripunctata (O.F.Müller) Bory	II, IV–VII, VIII–XII	I	II, IX–X	I	Ъ	Х	П	Ч	θ
167 <i>N. trivialis</i> Lange-Bertalot	1	XII–II, VII–VIII	I	I	Ъ	Х	П	Ч	ರ
168 N. viridula (Kützing) Ehrenberg «d»	I, V–VIII, XII	XII-I, IV-IX (I-II, X-XII)	I, V–VIII	(IV-VI) IIX-I	р	Х	ПС	Ч	ъ
169 N. vulpina Kützing	Ι	IV, VII–VIII	Ι	Ι	Б	Б	П	Ч	0
Family Neidiaceae Mereschkowsky									
Genus Neidium Pfitzer									
170 N. affine (Ehrenberg) Pfitzer	1	IV, VIII	I	IX	Ъ	Х	П	Ин	0
$171 \left \begin{array}{c} N. affine \text{ var. } amphirhynchus (Ehrenberg) \\ Cleve \end{array} \right $	1	NIII	ПΧ	Ι	Б	К	П	Ин	0
172 N. iridis (Ehrenberg) Cleve	II, VII–IX, XII	IV, VI–VII	V, VIII	Ν	ы	X		Ин	<u>ө-</u> 9
173 N. productum (W.Smith) Cleve	XI	II, VII	I	I	Ъ	Х	П	Ин	0-В
Family Pinnulariaceae D.G.Mann									
Genus Pinnularia Ehrenberg									
174 <i>P. acrosphaeria</i> var. <i>laevis</i> (M.Peragallo & Héribaud) Cleve	1	ЛИ	I	VII, X	Р	Ш	П	П	Ш
175 P. acrosphaeria W.Smith	1	I	IV, VII, X	I	Ъ	СŢ	П	Ин	0
176 P. borealis Ehrenberg	I, VII	IV, VII	VI–IX	Ν	Ъ	c-a	П	$M_{\rm H}$	0-B
177 *P. brevicostata Cleve	I	NIII	ſ	IV	Ъ	II	П	Ац	0
178 P. dactylus Ehrenberg	1	II, VII	I	IV, VII	Ъ	Х	П	Ац	0
179 P. hemiptera Brébisson ex Greville	II	I	I	I	р	II	Ш	II	
180 *P. interrupta W.Smith	IV, IX	NIII	I	ΠЛ	Ъ	Х	П	Ац	9-9
181 P. major (Kützing) Rabenhorst	VII, IX–X	I	IV, VIII	NIII	Ъ	Х	П	Ин	В
182 *P. mesolepta (Ehrenberg) W.Smith	1	VII–IX	Ι	I	Ъ	Х	П	Ац	0-В
183 P. neomajor Krammer	Π	$X-\Pi \Lambda$	I	VIII, IX	ы	II	II	II	II
184 P. nobilis (Ehrenberg) Ehrenberg	I	IX	IX-X	I	Ъ	Х	ПС	Ац	0
185 P. nodosa (Ehrenberg) W.Smith	Π	I	Ι	Х	Ъ	a-a	П	Ац	0
186 Pinnularia species	1	I	Λ	Ι		II	II	II	Ш
187 P. stomatophora (Grunow) Cleve	I	ΝП	I	I	ы	II	П	II	Ш
188 P. subcapitata W.Gregory	Ι	VII–VIII	I	I	Ъ	=	П	=	=

Экология / Есогоду

Геосистемы переходных зон, 2021, 5(4)

Å	Таксон	1	2	3	4		а	a 6	а б в	а б в г	а б в г
89	P. viridis (Nitzsch) Ehrenberg	V-VI, VIII-XII	II, VI–X	II–IV, VII–XII	VI, VIII, X	щ		5 K	K II	К П Ин	К П Ин
	Family Pleurosigmataceae Mereschowsky										
	Genus Pleurosigma W.Smith										
90	P. angulatum (J.T.Quekett) W.Smith	IV-VI, VIII-XI	Ι	Ι	Ι	ц		Х	K CM	K CM AJ	K CM AJ
91	P. elongatum W.Smith	NIII	Ι	Ι	Ι	Ъ		Х	K CM	K CM M _H	K CM M _H
192	P. formosum W.Smith	XII	I	I	I	Ъ		ABT	ABT M	ABT M AJ	АБТ М Ал
	Family Sellaphoraceae Mereschkowsky										
	Genus Fallacia Stickle & D.G.Mann										
193	F. pygmaea (Kützing) Stickle & D.G.Mann	I	Ι	Ι	VIII	Ъ		Ш	=	= C =	= C =
	Genus Sellaphora Mereschowsky										
194	S. bacillum (Ehrenberg) D.G.Mann	I	ΛIII	Ι	Ι	р		Х	КП	К П Ал	К П Ал
195	S. rectangularis (Gregory) Lange-Bertalot & Metzeltin	VI, VIII–XI	VIII-X		ΙΛ	р		Х	K IIC	К ПС Ин	К ПС Ин
196	*S. mutata (Krasske) Lange-Bertalot	I	ПЛ	Ι	Ι	Ъ		Х	КП	К П Ин	К П Ин
197	S. pupula (Kützing) Mereschkovsky	IV	NIII	I	Ι	Ъ		Ч	К П	К П Ин	К П Ин
198	S. wummensis J.R.Johansen	I	NIII	Ι	I	Ъ		Х	КП	К П Ин	К П Ин
	Family Stauroneidaceae D.G.Mann										
	Genus Craticula Grunow										
199	C. ambigua (Ehrenberg) D.G.Mann	Ι	Ι	XII	Ι						
200	C. cuspidata (Kutzing) D.G.Mann	IV	VIII	Х	I	Б	А		MC	MC AJ	МС Ал
	Genus Stauroneis Ehrenberg										
201	S. anceps Ehrenberg	Π	IIIV–IIV	I	NIII	р	Х		П	П Ин	П Ин
202	*S. anceps var. linearis (Ehrenberg) JJ.Brun	I	IIA	I	I	р	X			П Ин	П Ин
	Genus Prestauroneis K.Bruder & Medlin										
203	*P. integra (W.Smith) K.Bruder	VII-VIII	XII-II, VIII, X-XI	I, VII–VIII, X	I	ы	P		C	С Ин	C MH
	Order Rhopalodiales D.G.Mann										
	Family Rhopalodiaceae (Karsten) Topachevs'kyj & Oksiyuk										
	Genus Epithemia Kützing										
204	E. adnata (Kützing) Brébisson	II, VIII–IX	III/-II/	I–II, IV, VIII–XI	Ι	Ъ	Х		ПC	ПС Ал	ПС Ал
205	E. argus (Ehrenberg) Kützing	I, XII	Π	VII, IX–X, XII	ПЛ	II-Б	X		: IIC	ПС Ал	: ПС Ал
206	E. gibba (Ehrenberg) Kützing	IV	VII-VIII	I–II, V, X	I	Ъ	щ	\mathbf{v}	ζ IIC	К ПС Ин	с ПС Ин
207	E. turgida (Ehrenberg) Kützing	I	ΠЛ	Π	Ι	Ъ	Ч		ПC	ПС Ал	ПС Ал

Экология / Есоьоду

										ſ
Å	Таксон	-1	2	3	4	в	9	в	Г	ц
208	E. turgida var. granulata (Ehrenberg) Brun	IV, VI–VII, X	I	II, X–XI	I	ы	Я	IIC	ЧЛ	θ
	Genus Rhopalodia Otto Müller									
209	R. gibberula (Ehrenberg) O.Müller	Ι	V, VII	Ι	I	Ъ	Ч	ПС	Ч	
210	R. musculus (Kützing) O.Müller	VIII, XI–XII	ЛΙ	Ι	I	Б	К	С	Ч	0
	Order Surirellales D.G.Mann									
	Family Entomoneidaceae Reimer									
	Genus Entomoneis Ehrenberg									
211	E. alata (Ehrenberg) Ehrenberg	I-IV, VI-XII	I	I	IV	II-B	11	U	Ш	II
212	E. ornata (Bailey) Reimer	XII	I	I	I	II-B	Х	П	Ин	0
213	E. paludosa (W.Smith) Reimer	VIII–IX, XI	Ι	I	I	П	К	ПС	Ин	0
	Family Surirellaceae Kützing									
	Genus Iconella Jurilj									
214	I. biseriata (Brébisson) Ruck & Nakov	Ι	П, VП	I	I	II-B	Х	П	Ч	θ
215	<i>I. capronii</i> (Brébisson & Kitton) Ruck & Nakov	IX	П, VII, IX–Х	IIX	Х	ы	Х	ПС	Ч	В
216	I. linearis (W.Smith) Ruck & Nakov	I	Ι	I	IV	Ъ	Х	П	Ин	θ
217	I. robusta (Ehrenberg) Ruck & Nakov	VII, IX	Ι	I	I	Ъ	Ч	ПC	Ин	β
218	I. tenera (W.Gregory) Ruck & Nakov	VII-VIII, XI	VII-VIII	IX-IIA	IIIA	II-B	Х	П	Ч	θ
219	*I. levanderi (Hustedt) Ruck & Nakov	Ι	Ι	Ι	Х	Б		П	=	=
	Genus <i>Campylodiscus</i> Ehrenberg ex Kützing									
220	C. echeneis Ehrenberg ex Kützing	Ι	Х	Ι	I	Р	К	С	ЧЛ	
	Genus Surirella Turpin									
221	S. angusta Kützing	II, VI–XI	V, VII, X–XI	IIX–IX	NIII	Ъ	Х	П	Ч	θ
222	S. minuta Brébisson ex Kützing	I, IV, VI–XII	Ι	Ι-ΙΧ	I	П-Б	Ч	П	Ч	β-α
223	S. brebissonii var. kuetzingii Krammer & Lange-Bertalot	I	ХІІ-ІІ, V-VІІІ, Х-ХІ	Ι	IIIA–IA	II-B	Х	ПС	Ч	В
224	*S. librile (Ehrenberg) Ehrenberg	IV, VI, IX	ΛIII	I	I	II-B	Ч	П	Ч	В
225	S. ovata f. constricta (Hustedt) Cleve-Euler	Ι	VIII	I	I	р	Х	П	ЧЛ	
226	S. ovalis Brébisson	VII, IX–XII	ПΛ	Ι	I	Ъ	Ъ	C	Ин	
227	S. salina W.Smith	Ι	V-V	Ι	I	II-B	Ч	П	Ч	β-α
228	S. splendida (Ehrenberg) Kützing	II, IV	Ι	II-V	I	П	Х	П	ЧЛ	Ю
229	S. ussuriensis Skvortzov [Skvortsow]	VII	Ι	V	I	р	P	Ш	Ш	Ш
	Order Tabellariales Round									

2	E	-	c	,			l			
R	І аксон	I	7	ς.	4	в	0	B	4	Ħ
	Family Tabellariaceae Kützing									
	Genus Asterionella Hassall									
230	A. formosa Hassall	X, XI	I, IV, VII, VIII	Λ	VI, VII	П	Х	ПС	Ч	0-β
	Genus Diatoma Bory									
231	D. tenuis C.Agardh	II-IV, VIII-IX, XI	Ι	II–IV, IX, XI	Ι	П-Б	Х	П	Ч	0-β
232	D. vulgaris Bory	I	Ι	I, XII	Ι	II-B	Х	П	ЧЛ	β
233	D. moniliforme (Kützing) D.M.Williams «d»	IX–XI	I	X–XI (IX)	I	II-B	Х	ПС	Ин	β-α
	Genus Meridion C.Agardh					П	11	П	П	
234	M. circulare (Greville) C.Agardh	IIX-I	IX–IIX	IIX-I	IX-I	П-Б	Х	П	Ч	β
235	M. constrictum Ralfs «d»	I-VI, VIII-XII	XII–XI (IV)	I-XII	I-XII	П-Б	K	П	ЧЛ	=
	Genus T <i>abellaria</i> Ehrenberg ex Kützing									
236	T. flocculosa (Roth) Kützing	IX, XI	I	I	IX	П-Б	Х	П	ЧЦ	0
237	T. fenestrata (Lyngbye) Kützing	II, VIII–X	II, IX	Ι	П	П-Б	K	П	Ац	β
	Order Thalassiophysales D.G.Mann									
	Family Catenulaceae Mereschkowsky									
	Genus Amphora Ehrenberg ex Kützing									
238	A. libyca Ehrenberg	I, VII–XI	П, VП, VШ	I	VI-VIII	Ъ	К	ПС	Ч	
239	A. ovalis (Kützing) Kützing «d»	II-VI, VIII-XII (V)	II, VII, VIII	IV-VI, VIII, XI, XII	Ι	Ъ	Х	П	Ч	0-β
240	A. pediculus (Kützing) Grunow	I	Ι, Π	I	Ι	Б	К	П	Ч	β-α
	Order Thalassionematales Round									
Å	Таксон	1	2	3	4	а	9	в	Г	ц
	Family Thalassionemataceae Round									
	Genus Thalassionema Grunow ex Mereschkowsky									
241	T. nitzschioides (Grunow) Mereschkowsky	II, IV	I	I	I	П-Б	х	Σ	11	
	Class Coscinodiscophyceae Round & R.M.Crawford									
	Order Aulacoseirales R.M.Crawford									
	Family Aulacoseiraceae R.M.Crawford									
	Genus Aulacoseira Thwaites									
242	A. subarctica (Otto Müller) E.Y.Haworth	ΛΙΙΙ	VII, VIII	Λ	II,IV,VII, XII	П	Х	П	ЧЦ	0
243	A. distans (Ehrenberg) Simonsen	I	Х	I	I	II-B	a-a	IIC	Ац	ν-γ
	Order Melosirales R.M.Crawford									

ſ										
Š	Таксон	1	2	3	4	a	9	в	г	ц
	Family Melosiraceae Kützing									
	Genus Melosira C.Agardh									
244	M. moniliformis (O.F.Müller) C.Agardh	I, IV, VIII–IX, XI	I	I	I	II-B	ABT	MC	ЧЛ	ъ
245	M. varians C.Agardh «d»	IIIV-VII) IIX-I	(IX-XI) IX-IIX	I-XII (I-II, VIII-XII)	IXV	II-B	Ч	ПС	ЧЛ	ъ
246	M. nummuloides C.Agardh	V, VIII–X	I	I	I	П-Б	Ч	MC		Ш
	Order Paraliales R.M.Crawford									
	Family Paraliaceae R.M.Crawford									
	Genus Paralia Heiberg									
247	P. sulcata (Ehrenberg) Cleve	IX	I	I	Ι	р	Х	CM		
	Class Mediophyceae (Jousé & Proshkina- Lavrenko) Medlin & Kaczmarska									
	Order Eupodiscales V.A.Nikolaev & D.M.Harwood									
	Family Odontellaceae P.A.Sims, D.M.Williams & M.P.Ashworth									
	Genus Odontella C.Agardh									
248	O. aurita (Lyngbye) C.Agardh	IV-V	I	I	I	П-Б	Х	М		
	Order Stephanodiscales Nikolaev & Harwood									
	Family Stephanodiscaceae I.V.Makarova									
	Genus Cyclostephanos Round									
249	C. dubius (Hustedt) Round	IX	I	1	I	П		Ш	Ш	Ш
	Genus Cyclotella (Kützing) Brébisson									
250	C. meneghiniana Kützing	VIII, X	I	XI	I	П	Х	ПС	ΓЧ	ρ
251	Cyclotella (Kützing) Brébisson species «d»	V-VI, VIII-XI (IX-X)	XII-II, VII, VIII-XI	V-XII	VI, VIII–XI	П	Ш	Ш	Ш	Ш
	Genus Discotella V.Houk & R.Klee									
252	D. stelligera (Cleve & Grunow) Houk & Klee	IX	III/-I/	I	ШЛ-ШЛ	Ш	К	ПС	ЧЛ	β
	Genus <i>Lindavia</i> (Schütt) De Toni & Forti									
253	L. radiosa (Grunow) De Toni & Forti	V–VI, XII	Х	Ι	I	П	К	ПС	ΓЧ	β
	Genus Stephanodiscus Ehrenberg									
254	S. minutulus (Kützing) Cleve & Möller	IX	Π	Х	I	П		ПС	ЧЛ	β
	Order Thalassiosirales Glezer & Makarova									

Š	Таксон	1	2	e	4	5	0	B	ĥ	П
	Family Skeletonemataceae Lebour									
	Genus Skeletonema Greville									
255	S. costatum (Greville) Cleve	Π	Ι	Ι	Ι	П	Х	CM	"	σ
	Family Thalassiosiraceae M.Lebour									
	Genus Thalassiosira Cleve									
256	T. baltica (Grunow) Ostenfeld	II, VI, VIII, XI	Ι	I	Ι	Ш	Ъ	U	II	II
257	, <i>T. bramaputrae</i> (Ehrenberg) Håkansson & Locker	VIII	I	I	I	Ш	Ъ	ПС	Ин	β
258	T. nordenskioeldii Cleve	II, XII	I	Ι	I	Ш	AE	Μ	цA	II
259	Thalassiosira Cleve species	П	I	I	I		Ш		Ш	Ш
	Phylum Cercozoa Cavalier-Smith									
	Class Thecofilosea Cavalier-Smith									
	Order Ebriida Deflandre									
	Family Ebriidae Lemmermann									
	Genus Ebria A.H.C.Borgert									
260	E. tripartita (J.Schumann) Lemmermann	IX	I	I	I	П	Ъ	CM		
	Phylum Cryptophyta Cavalier-Smith									
	Class Cryptophyceae F.E.Fritsch									
	Order Pyrenomonadales G.Novarino & I A N I neas									
	Family Geminigeraceae B.L.Clay, P.Kugrens & R.E.Lee									
	Genus Teleaulax D.R.A.Hill									
261	T. amphioxeia (W.Conrad) D.R.A.Hill	VIII	Ι	I	I	П	K	CM		II
	Phylum Miozoa Cavalier-Smith									
	Class Dinophyceae F.E.Fritsch									
	Order Peridiniales Haeckel									
	Family Kryptoperidiniaceae Er.Lindemann									
	Genus Blixaea Gottschling									
262	B. quinquecornis (Abé) Gottschling	IX	Ι	Ι	Ι	Ш	=	ПСN	- I	=
	Family Peridiniaceae Ehrenberg									
	Genus Parvodinium Carty									
263	*P. umbonatum (F.Stein) Carty	VIII	I	I	I	Ш	К	П	Ин	0-β
	Genus Peridinium Ehrenberg									

Ÿ	Таксон		2	3	4	а	9	в	L	д
264	¹ P. cinctum (O.F.Müller) Ehrenberg	I	I	I	IX	Ш	Х	Ш	Ин	о-β
	Phylum Ochrophyta Cavalier-Smith									
	Class Chrysophyceae Pascher									
	Order Chromulinales Pascher									
	Family Dinobryaceae Ehrenberg									
	Genus Dinobryon Ehrenberg									
265	D. divergens O.E.Imhof «d»	I, IX–X	I, VI, X (I)	I	Ι	Ш	X	Ш		β
	Order Hydrurales Pascher									
	Family Hydruraceae Rostafinsky									
	Genus Hydrurus C. Agardh									
266	H. foetidus (Villars) Trevisan «d»	I	IV-VII (IV-VI)	IV-V	I-II, VI-VIII (VI)	р	Х	Ш	=	х-с
	Class Dictyochophyceae P.C.Silva									
	Order Dictyochales Haeckel									
	Family Dictyochaceae Lemmermann									
	Genus Dictyocha Ehrenberg									
267	D. fibula Ehrenberg	XII	I	Ι	I	Ш	X	Σ		
	Genus Octactis J.Schiller									
268	8 O. speculum (Ehrenberg) F.H.Chang, J.M.Grieve & J.E.Sutherland	I, X	I	Ι	I	П-Б	¥	М	11	П
	Class Xanthophyceae Allorge ex Fritsch									
	Order Tribonematales Pascher									
	Family Tribonemataceae G.S.West									
	Genus Tribonema Derbès & Solier									
269	T. vulgare Pascher	Ι	Х	Ι	Ι	П-Б	K	JC	=	о-β
	Kingdom Plantae Haeckel									
	Phylum Chlorophyta Reichenbach									
	Class Trebouxiophyceae Bold & M.J.Wynne									
	Order Chlorellales Bold & M.J.Wynne									
	Family Chlorellaceae Brunnthaler									
	Genus Closteriopsis Lemmermann									
270	C. longissima (Lemmermann) Lemmermann	I	I	VIII	I	Ξ	Х	ш	=	о-β
	Order Prasiolales Schaffner									

ŝ	Таксон	1	2	3	4	а	9	В	Γ	ц
	Family Koliellaceae Hindák									
	Genus Koliella Hindák					¢		Þ	1	
271	K. spiculiformis (Vischer) Hindåk	VIII	I	VIII-XI	I	II	11	=	Ин	Ы
	Class Chlorophyceae Wille									
	Order Chaetophorales Wille									
	Family Chaetophoraceae Greville									
	Genus Draparnaldia Bory									
272	2 D. mutabilis (Roth) Bory «d»	I	ΠΛ	VII, XI (XI)	I	Б		П	=	0-)
	Genus Stigeoclonium Kützing									
273	3 *S. tenue (C.Agardh) Kützing «d»	V (V)	ΛΙ	V, XI	I	II-Б	Х	П	Ин	α
	Order Sphaeropleales Luerssen									
	Family Hydrodictyaceae Dumortier									
	Genus Pseudopediastrum E.Hegewald									
274	1 P. boryanum (Turpin) E.Hegewald	Ν	Ι	VII	Ι	Ш	К	ПС	Ин	β
	Genus Stauridium Corda									
275	S. tetras (Ehrenberg) E.Hegewald	1	I	IX	Ι	П-Б	К	П	Ин (-β
	Family Microsporaceae Bohlin									
	Genus Microspora Thuret									
276	5 * <i>M. quadrata</i> Hazen	I	I	IX	I	П-Б	K	Ш	Ин	0
	Family Scenedesmaccae Oltmanns									
	Genus Scenedesmus Meyen									
277	7 *S. obtusus var. apiculatus (West & G.S.West) Tsarenko	I	I	VIII-X	Ι	П-Б	К	Ш	Ин	
	Genus Tetradesmus G.M.Smith									
278	3 T. lagerheimii M.J.Wynne & Guiry «d»	VIII-X (VIII)	VIII, X	VIII-X (VIII)	I	Ш	Х	П	Ин	β
279	T. obliquus (Turpin) M.J.Wynne	I	I	VIII–IX, XI	I	II-B	К	П	11	β
	Family Selenastraceae Blackman & Tansley									
	Genus Ankistrodesmus Corda									
280	A. arcuatus Korshikov	VIII	I	VIII–IX, XI	VIII	II-B	К	П	Ин	β
	Class Ulvophyceae K.R.Mattox & K.D.Stewart									
	Order Cladophorales Haeckel									
	Family Cladophoraceae Wille									
	Genus Cladophora Kützing									

Å	Таксон		5	e	4	a	9	в	L	Ц
281	C. glomerata (Linnaeus) Kützing	I	I	I–II, V, VIII–XII	1	ы	X		Ин	_ ص
	Order Ulotrichales Borzì									
	Family Ulotrichaceae Kützing									
	Genus Ulothrix Kützing									
282	*U. tenuissima Kützing «d»	V (V)	VIII	IV, VI–VII	VIII	П-Б	Х	Ш	$M_{\rm H}$	β
283	U. zonata (F.Weber & Mohr) Kützing «d»	Λ	XII, VI, VIII, X–XI (VI–XI)	IV-VII, X	II-V, VII,IX, XI (VII)	П-Б	Х	П	Ин	β-α
284	Ulothrix Kützing species	Λ	1	Х	Ι	=	=	=	=	Ш
	Phylum Charophyta Migula									
	Class Conjugatophyceae (Zvonematonhyceae) Engler									
	Order Desmidiales C.E.Bessey									
	Family Closteriaceae Bessey									
	Genus Closterium Nitzsch ex Ralfs									
285	C. moniliferum Ehrenberg ex Ralfs	I	I	VIII-IIX	ΠΛ	П	У	Ш	Ин	β
286	C. parvulum Nägeli	I	NIII	I	I	П	Х	Ш	Ин	β-α
287	*C. strigosum Brébisson	I	VIII, X–XI	I	I	II		Ш	II	II
	Family Desmidiaceae Ralfs									
	Genus Cosmarium Corda ex Ralfs									
288	C. formosulum Hoff	I	VIII	VIII, X	I	П-Б	Х	Ш	Ин	β
289	Cosmarium Corda ex Ralfs species	I	VIII	I	I	11		Ш	11	II
	Order Zygnematales C.E.Bessey									
	Family Zygnemataceae Kützing									
	Genus Spirogyra Link									
290	Spirogira Link species (стерильная форма)	I	VIII	IX, XI	I	11		II		II
	Class Klebsormidiophyceae C.Hoek, D.G.Mann & H.M.Jahns									
	Order Klebsormidiales K.D.Stewart & K.R.Mattox									
	Family Klebsormidiaceae K.D.Stewart & K.R.Mattox									
	Genus Klebsormidium P.C.Silva, Mattox & W.H.Blackwell									
291	*K. subtile (Kützing) Mikhailyuk, Glaser, Holzinger & Karsten	Ι	I	IX	I	II-B	II	Ш	II	Ш
	Phylum Rhodophyta Wettstein									

Å	Таксон	_	2	с	4	а	9	B	L	ц
	Class Florideophyceae Cronquist Order Acrochaetiales Feldmann Family Acrochaetiaceae Melchior									
292	Genus Audouinella Bory A. chalybea (Roth) Bory	I	IIIA	1	1	P	X			0-X
	Order Batrachospermales Pueschel & K.M.Cole Family Batrachospermaceae C.Agardh									
293	Genus Batrachospermum Roth B. gelatinosum (Linnaeus) De Candolle	I	IV	1	I	P	Х	<u> </u>		χ-β
	Empire Prokaryota Allsopp Kingdom Eubacteria Cavalier-Smith Phylum Cyanobacteria Stanier ex Cavalier-Smith									
	Class Cyanophyceae Schaffner Order Oscillatoriales Schaffner Family Microcoleaceae O.Strunecky, J.R.Johansen & J.Komárek									
	Genus Microcoleus Desmazières ex Gomont									
294	l M. autumnalis (Gomont) Strunecky, Komárek & J.R.Johansen «d»	IV-VII, IX-X (VII, IX)	І, V, VІІ–VІІІ, Х	II-VII (VII)	IV, VII–VIII	П-Б	К	Ш	II	β-α
	Family Oscillatoriaceae Engler									
295	Lyngbya C.Agardh ex Gomont species «d»	VIII-XI (IX-XI)	I	I	I	11	Ш	Ш	Ш	
	Genus Oscillatoria Vaucher ex Gomont									
296	0. limosa C.Agardh ex Gomont «d» Genus Phormidium Kützing ex Gomont	ΠΛ	IX (IX)	1	I	II-B	K	П	П	ъ
297	P. aerugineo-caeruleum (Gomont) Anagnostidis & Komárek «d»	(ХІ-ША) ХІ-ША	I	I	I	II-B	К	П	II	β-α
298	P. autumnale f. uncinatum Boye Petersen	I	I	VII, IX–XI	I	р	Х	II=C	Ш	ъ
299	*P. retzii Kützing ex Gomont «d»	I	I	VII, IX (VII)	I	II-B	Ъ	П	Ин	
	Order Spirulinales J.Komárek, J.Kastovsky, Mareš & J.R.Johansen									

Ÿ	Таксон	1	2	3	4	а	9	В	г	Ħ
	Family Spirulinaceae (Gomont) L.Hoffmann, J.Komárek & J.Ka									
	Genus Spirulina Turpin ex Gomont									
Å	Таксон	1	2	3	4	а	9	в	Г	Ħ
300	*S. major Kützing ex Gomont	Ι	Π	Ι	Η	П-Б	K	1 1	lн о	d-)
301	Spirulina Turpin ex Gomont species	I	ΠЛ	NIII	I					
	Order Synechococcales L.Hoffmann, J.Komárek & J.Kastovsky									
	Family Coelosphaeriaceae Elenkin									
	Genus <i>Phormidesmis</i> Turicchia, Ven- tura, Komárková & Komárek									
302	* <i>P. mollis</i> (Gomont) Turicchia, Ventura, Komárková & Komárek	I	I	1	Π	р	Х	Ш	Ш	В
	Family Leptolyngbyaceae Komárek, J.Kastovsky, Mareš & J.R.Johansen									
	Genus Tapinothrix Sauvageau									
303	<i>T. varians</i> (Geitler) Bohunická & J.R.Johansen «d»	ΓΛ	V-IX (V-IX)	IV-IX, XI (IV-VII, IX)	IV, VII-VIII (IV-IX)	р	II	Ш	Ш	0
					1					

ленность его равнялась или превышала 20% от общей численности. «d» – доминирующий по численности вид (строки выделены тоном); «*» – виды и внутривидовые таксоны, впервые Notes: 1 – estuarien zone, 2 – Partizanka River, 3 – middle reach of the river, 4 – Frikena River. The Roman numerals indicate the month of the species finding, its number was equal or exceeded 20 % of the total number – in brackets in bold type. «d» – dominant species (strings are highlighted in tone); «*» – the species and intraspecific taxa that were first indicated for the Sakhalin Region; «–» the отмеченные для Сахалинской области; «-» – вид отсутствовал в водотоке. ЭКХ (эколого-географическая характеристика видов): а – местообитание: П – планктонный, Б – бентосный, П-Б – планктонно-бентосный; б – фитогеографическая характеристика: АБ – аркто-бореальный, АБТ – аркто-бореально-тропический, Б – бореальный, К – космополит, а-а – аркто-П – пресноводный, ПСМ – пресноводно-солоноватоводно-морской; *2* – отношение к pH: Ал – алкалибионт, Ин – индиферент, Ац – цидофил +ацидобионт; д – сапробность: species was absent in water course. JKX (ecology-geographycal characteristic): a - habitat: II - planktonic, E - benthic, II-5 - planktonic/benthic; δ - phytogeographic characteristic: AE - arcto-Примечания. 1– эстуарная зона, 2 – р. Партизанка, 3 – среднее течение реки, 4 – р. Фрикена. Римскими цифрами указан месяц нахождения вида, в скобках полужирным шрифтом – чисальпийский, с-а – северо-альпийский; в – отношение к солености воды: М – морской, СМ – солоноватоводно-морской, С – солоноватоводный, ПС – пресноводно-солоноватоводный boreal, ABT – arcto-boreal-tropical, E – boreal, K – cosmopolit, a-a – arcto-alpian; e – north-alpian; e – relation to water salinity: M – marine, CM – brackish water/marine, C – brackish water, IC – fresh water/brackish water, II – fresh water/ Markish water/marine; z – relation to pH: A.I. – alkalibionts, IH – indifferent, A.I. – acidophiles + acidobionts; χ – ксеносапробный, ο – олигосапробный, m – мезосапробный, α – альфа-мезосапробный, β – бета-мезосапробный, ρ – полисапробный; «=» – характеристика неизвестна.

427

 ∂ - saprobity: χ - xenosaprobionts, o - oligosaprobionts, m - mezosaprobionts, α - alpha-mezosaprobionts, β - beta-mezosaprobionts, ρ - polysaprobionts; \ll - characteristic is unknown.

Об авторе

MOTbIJIbKOBA Ирина Викторовна (https://orcid.org/0000-0003-2449-4933), ведущий специалист лаборатории гидробиологии, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (CaxHИPO), Южно-Сахалинск, surirella@mail.ru

MOTYLKOVA Irina V. (https://orcid.org/0000-0003-2449-4933), Leading specialist of Hydrobiology Laboratory, Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (SakhNIRO), Yuzhno-Sakhalinsk, surirella@mail.ru Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 502.3;504.73:582.29

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.428-438

Особенности распространения эпифитных лишайников на коре тополя Максимовича в городе Южно-Сахалинск и его окрестностях

© 2021 В. В. Каганов^{*1,2}, А. В. Кордюков^{*1}, А. К. Ежкин¹

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия ²Сахалинский филиал Ботанического сада-института ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: vladimirkaganov@mail.ru; a.kordyukov@imgg.ru

Резюме. Приводятся результаты исследования эпифитных лишайников как биоиндикаторов загрязнения атмосферы в городе Южно-Сахалинск, а также в его окрестностях в местах естественного произрастания тополя. В качестве субстрата выбран тополь Максимовича, как наиболее распространенный форофит в озеленении города. Всего на коре тополя Максимовича на 15 площадках в районе исследования зарегистрировано 47 видов эпифитных лишайников. Оценивали видовой состав, встречаемость лишайников, разнообразие, чувствительность к загрязнению, токсифобность. По результатам кластерного анализа выделены 3 кластера, отражающие степень антропогенного воздействия на эпифитные лишайники. В зависимости от приуроченности к этим кластерам выявлены 4 группы лишайников по степени чувствительности к антропогенному воздействию.

Ключевые слова: лихеноиндикация, биомониторинг, городская среда, антропогенное воздействие

Distribution features of epiphytic lichens on *Populus maximowiczii* in Yuzhno-Sakhalinsk city and its suburbs

Vladimir V. Kaganov*1,2, Alexander V. Kordyukov*1, Alexander K. Ezhkin1

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia ²Sakhalin Branch of the Botanical Garden-Institute, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: vladimirkaganov@mail.ru; a.kordyukov@imgg.ru

Abstract. The results of research of epiphytic lichens as bioindicators of the atmosphere pollution in Yuzhno-Sakhalinsk city and its suburbs are reported. *Populus maximowiczii* was chosen as the most common tree species in the plantings of the city as a lichen substrate. Control sites was chosen in natural habitats of *Populus maximowiczii* in surroundings of the city. In total, 47 lichen species were registered on bark of *Populus maximowiczii* on all sites. Three clusters of anthropogenic influence on lichens were defined by the results of the cluster analysis of 15 stations where species composition and occurrence frequency were registered. Four groups of lichen sensitivity to anthropogenic influence were identified according to confinement to these three clusters. The analysis of species distribution by the degree of sensitivity was made for each site.

Keywords: lichenindication, biomonitoring, urban zone, anthropogenic impact

Для цитирования: Каганов В.В., Кордюков А.В., Ежкин А.К. Особенности распространения эпифитных лишайников на коре тополя Максимовича в городе Южно-Сахалинск и его окрестностях. Геосистемы переходных зон, 2021, т. 5, № 4, с. 428–438.

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.428-438

For citation: Kaganov V.V., Kordyukov A.V., Ezhkin A.K. Distribution features of epiphytic lichens on *Populus maximowiczii* in Yuzhno-Sakhalinsk city and its suburbs. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 428–438. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.428-438

Введение

Эпифитные лишайники – одни из наиболее известных биологических индикаторов, оценка состояния которых используется при мониторинге окружающей среды и деградации экосистем. Большой опыт применения эпифитных лишайников накоплен в биомониторинге урбанизированных территорий [Бязров, 2002; Ерофеева, Сергеева, 2014].

Одно из наиболее распространенных деревьев в посадках г. Южно-Сахалинск – тополь Максимовича (Populus maximowiczii A. Henri). Он массово применялся в озеленении города с середины прошлого века. Дикорастущий тополь Максимовича формирует по долинам рек на Сахалине чистые тополевники, ивовотополевые, тополево-чозениевые или другие смешанные леса [Сабиров, 2017; Корзников, Ежкин, 2019]. Его распространенность в естественных и искусственных природных ландшафтах дает хорошую возможность для оценки и сравнения видового состава лишайников-эпифитов на участках с разной антропогенной нагрузкой, что служит одним из главных условий для проведения лихеноиндикационных исследований [Бязров, 2002]. Возможность использования эпифитных лишайников в качестве индикаторов состояния окружающей среды определила цель настоящей работы – определить видовой состав и встречаемость лишайников, обитающих на коре тополя Максимовича в городе Южно-Сахалинск и его окрестностях, выявить особенности их распространения в зависимости от степени антропогенной нагрузки.

Географическая и климатическая характеристика района исследований

Исследования проходили в черте города Южно-Сахалинск и его окрестностях – в долинах рек Рогатка и Красносельская, а также на удаленном участке – в долине р. Белая, близ с. Сокол Долинского района.

Столица областного центра расположена на юго-востоке о. Сахалин в центральной части Сусунайской долины, вытянутой в меридиональном направлении, между Сусунайским и Мицульским хребтами.

Район относится к Южно-Сахалинской климатической области, которая характеризуется влажным муссонным климатом, значительным (около 860 мм/год) количеством осадков, теплыми южными ветрами летом и холодными северными и северо-западными ветрами зимой. Среднегодовая температура 2–3 °С со средней минимальной температурой в январе –13.5 °С и средней максимальной температурой в августе +17.2 °С. Значительная облачность и частые туманы формируют прохладный и влажный характер климата [Земцова, 1968].

Климатические условия местности и особенности географического положения (расположение города в зоне пониженного рельефа в окружении горных хребтов, частые атмосферные инверсии) препятствуют рассеиванию и выносу вредных веществ (взвешенные вещества, формальдегид, SO₂ и NO₂, тяжелые металлы и др.), поступающих в атмосферу от различных источников (автомобильного и железнодорожного транспорта, твердотопливных котельных и т.д.) [Доклад..., 2021]. В результате образуется плотный слой смога, который в течение долгого времени находится в нижних слоях атмосферы. В связи с длительным и непрерывным загрязнением города, а также антропогенной трансформацией естественных участков растительности в окрестностях города, для лихенобиоты города характерен набор видов, устойчивых к атмосферному загрязнению [Ежкин, Галанина, 2016].

Материалы и методы исследования

Исследование затрагивает особенности распределения лишайников-эпифитов на стволах тополя Максимовича на участках с потенциально различной антропогенной нагрузкой – центр города, скверы, часть городского парка, удаленные территории. Всего было обследовано 15 учетных площадок (рис. 1), на которых фиксировали видовой состав лишайников и их встречаемость на стволах тополя. Отбор площадок проводили по принципу наличия не менее 10 модельных деревьев тополя на участке. Модельные деревья были выбраны одинакового диаметра, без наклона относительно уровня почвы или с наклоном, который не превышал 10°.

В городских скверах было заложено 5 учетных площадок (№ 1–5, номера соответствуют табл. 2), находящихся вблизи дорог общего пользования и расположенных рядом с перекрестками улиц, наиболее загруженных автотранспортом: Сахалинской и проспекта Мира, Ленина и Пограничной, Ленина и проспекта Победы, Комсомольской и Сахалинской. В городском парке культуры и отдыха им. Ю.А. Гагарина заложены 3 площадки (№ 6, 7, 9),



Рис. 1. Карта-схема района исследования. Белыми точками отмечены учетные площадки: на нижней левой части – наиболее удаленная учетная площадка № 10 (в долине р. Белая); в центральной и правой частях – площадки на территории и в ближайших окрестностях г. Южно-Сахалинск (на фоне спутникового снимка DigitalGlobe).

Fig. 1. Sketch-map of the study area. White dots mark the regitration sites: the most distant site no.10 (in the Belaya River valley) is on the left bottom part; in the central and right parts there are the sites in the territory of Yuzhno-Sakhalinsk city and its surroundings (against the background of the DigitalGlobe satellite image).

одна – на лыжероллерной трассе спортшколы зимних видов спорта (№ 15). Шесть площадок – на территории Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ 8) и припойменных участках рек Красносельская, Рогатка и Белая (№ 10–14) – удалены от плотной дорожной сети.

Натурные исследования эпифитных лишайников проводились в летние месяцы 2018 г. Они включали рекогносцировочные работы, в частности закладку учетных площадок и сбор гербарного материала для последующего определения; измерения для оценки встречаемости лишайников.

Для последующего определения встречаемости использовали рамку 10 × 40 см, разделенную на 4 части – микроплощадки (10 × 10 см) (рис. 2). Рамка прикладывалась с четырех сторон ствола дерева на высоте от 1.1 до 1.5 м. Всего в районе исследований было заложено 2400 микроплощадок [Kaganov et al., 2019].

Сбор и сушку эпифитных лишайников проводили по общепринятой методике [Определитель лишайников..., 1974; Флора лишайников..., 2014]. В бумажные конверты помещали собранные объекты с полевой этикеткой, на которой указывали место сбора (номер точки), субстрат, дату сбора. Идентификацию лишайников осуществляли с помощью традиционных лихенологических методик [Определитель лишайников..., 1974; Флора лишайников..., 2014]. При определении использовались микроскопы Биолам, Микромед-2, МБС-10, реактивы: 10%-й раствор КОН, насыщенный водный раствор СаСl₂O₂, раствор I₂ в водном растворе йодистого калия и спиртовый раствор парафенилендиамина. Обработка и определение материалов проводились в лаборатории экологии растений и геоэкологии Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Названия таксонов даны согласно базе данных Index Fungorum, CABI Bioscience Databases (http://www.indexfungorum.org). Во время исследований было собрано не менее 400 образцов лишайников. Гербарий хранится в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН (SAK).

Для оценки биоразнообразия лишайников использованы индекс разнообразия Шеннона (1) [Shannon, Weaver, 1963] и индекс выравненности экологических сообществ Пиелу (2) [Pielou, 1966, 1975]:

$$H = -\sum \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N},\tag{1}$$



Рис. 2. Рамка 10×40 см на стволе тополя. **Fig. 2.** A frame of 10×40 сm on a poplar trunk.

$$E = {}^{H}/_{H_{max}},\tag{2}$$

где H – индекс Шеннона, E – индекс Пиелу, n_i – встречаемость *i*-го вида на учетной площадке, N – суммарная встречаемость видов на учетной площадке.

Для оценки антропогенного воздействия на особенности распределения лишайников был рассчитан индекс атмосферной чистоты (I.A.P.) по каждой учетной площадке по формуле (3), предложенной [LeBlanc, De Sloover, 1970] для оценки воздействия индустриальных объектов на состояние лихенобиоты и широко используемой в современных лихеноиндикационных исследованиях для определения уровня антропогенной нагрузки [Das et al., 2013; Adjiri et al., 2019; Tanona, Czarnota, 2020; Herzig et al., 2020]:

$$I.A.P. = \frac{1}{10} \sum Q_i \times F_i, \qquad (3)$$

где F_i – показатель встречаемости *i*-го вида, Q_i – коэффициент токсифобности (ассоциированности) *i*-го вида, определяемый по среднему количеству видов, сопутствующих данному виду на всех участках в исследуемом районе [Foucard, 2001]. Чем больше числовой показатель Q, тем более чувствителен к загрязнению вид. Для оценки особенностей распределения и встречаемости лишайников была выполнена кластеризация учетных площадок методом Варда [Ward, 1963]. Чувствительность лишайников определяли по значению коэффициента токсифобности (Q) и приуроченности видов к учетным площадкам с разной степенью антропогенной нагрузки, определенной по значениям I.А.Р. и особенностям биоразнообразия лихенобиоты. Выделены следующие группы чувствительности: толерантная (T), умеренно-толерантная (УТ), средне-чувствительная (СЧ), чувствительная (Ч) (табл. 1).

Результаты и обсуждение

На всех обследованных площадках на коре тополя Максимовича было зарегистрировано 47 видов эпифитных лишайников. Доминантами выступают в основном представители неморальных видов из родов *Physcia* (Schreb.) Michaux, *Physconia* Poelt, *Phaeophyscia* Moberg, *Physciella* Essl. В относительно чистых районах встречаются виды из родов *Lobaria* (Schreb.) Hoffm., *Leptogium* (Ach.) Gray, *Collema* F.H. Wigg., *Heterodermia* Trevis и другие.

Выявленные виды относятся к 8 порядкам, 14 семействам и к 26 родам. Большинство видов принадлежит к порядкам Teloshistales D. Hawks. et O.E. Erikss (15 видов, средний показатель встречаемости 76.9 %), Lecanorales Nannf. (13 видов, встречаемость 15.9 %, Peltigerales Walt. (7 видов, 4.5 %). Остальные порядки с меньшим количеством видов, показатель встречаемости которых не превышает 1 %. К доминирующим семействам по числу видов относятся *Physciaceae* Zahlbr. (15 видов, средний показатель встречаемости 70.7 %), Parmeliaceae Zenker (5 видов, 12.5 %) и *Teloshistaceae* Zahlbr. (5 видов, 7.7%). К числу ведущих родов отнесены: Lecanora Ach. (5 видов), Caloplaca Th. Fr. (4 вида), Phaeophyscia Moberg (3 вида), *Physconia* Poelt (3 вида).

Разброс значений рассчитанного индекса атмосферной чистоты (І.А.Р.) составил от 8.46 на учетной площадке, наиболее близкой (на расстоянии 23 м) к автомобильной дороге (№ 5 – сквер им. Г.И. Невельского), до 49.83 на одной из наиболее удаленных (расстояние 3070 м) от дорог площадок (№ 10 – долина р. Белая) (рис. 3).

В целом значение I.А.Р. и степень удаленности учетных площадок от автомобильных дорог подчиняется линейной зависимости, значение коэффициента детерминации (R^2) составляет 0.83 при р < 0.001.

На основании данных о встречаемости лишайников на учетных площадках был выполнен кластерный анализ. На рис. 4 приведена дендрограмма, визуализирующая степень сходства характеристик учетных площадок, с указанием их номеров и мест расположения.

На основе анализа групп кластеров принято решение выбрать значение Эвклидова



Рис. 3. Диаграмма связи между расстоянием до автодорог и значением индекса атмосферной чистоты. **Fig. 3.** Diagram of relation between the distance to public roads and Index of Atmospheric Purity value.

расстояния 130 (единиц) как разделяющее. При этом выделено 3 кластера. Они объединяют учетные площадки по уровню сходства состава и встречаемости эпифитных лишайников.

В кластер I попали площадки, в непосредственной близости от которых расположена густая дорожная сеть. Это городские скверы и дворовые территории (№ 1-5, расстояние до ближайших автодорог 23-80 м). Зарегистрировано 8 видов лишайников. По показателю встречаемости здесь доминируют Physciella melanchra (Hue) Essl. и Phaeophyscia hirtuosa (Kremplh.) Essl. Наименьшее значение индекса І.А.Р. в этом кластере отмечено на площадке № 5 (сквер им. Г.И. Невельского) – 8.46; наибольшее – 14.64 – на площадке № 1 (Аллея интернационалистов), среднее значение – 11.15. В целом для учетных площадок этого кластера характерны меньшие значения І.А.Р. по сравнению с другими двумя кластерами.

Кластер II составили площадки, расположенные в городском парке и на территории ИМГиГ ДВО РАН – на расстоянии 38–225 м от дорог (№ 6–9). В этом кластере зарегистрировано 12 видов лишайников. Количество видов увеличилось по сравнению с кластером I на 4: добавились виды родов *Caloplaca*, *Lecanora*, *Parmelia* и *Physconia*. Минимальное значение I.А.Р., равное 13.28, отмечено на площадке



Рис. 4. Дендрограмма сходства 15 исследованных участков. Красной линией обозначено разделяющее значение Эвклидова расстояния. Номера участков соответствуют табл. 2.

Fig. 4. Dendrogram of similarities between 15 studied sites. The red line marks the separating value of the Euclidean distance. Numbers of the sites are in accordance with the table 2.

	_	Группа	Встречаем	ость по класт	герам (в %)
Вид лишайника	Q	чувстви- тельности	Ι	II	III
Anaptychia isidiza Kurok.	21.25	СЧ	_	_	2.3
Arthonia sp.	30	H/o	_	_	0.7
Bacidia sachalinensis J. Gerasimova, A. Ezhkin & A. Beck	25.5	Ч	_	_	2.5
Buellia disciformis (Fr.) Mudd.	23.5	СЧ	_	_	1.5
B. erubescens Arnold.	17	СЧ	_	_	0.4
<i>Buellia</i> sp.	19	СЧ	_	_	4.4
Caloplaca cerina (Ehrh. ex Hedwig) Th. Fr.	17	СЧ	_	_	0.1
C. tarani S.Y. Kondr., S.I. Tchabanenko, I. Galanina &	21.22	TT			1 7
L. Yakovczenko	21.33	Ч	_	_	1./
Candelaria concolor (Dicks.) Stein.	8.46	УТ	11.82	25.31	5.7
Cetrelia cf. olivetorum (Nyl.) W.L. Culb. & C.F. Culb.	21	Ч	_	_	0.3
Collema furfuraceum Du Rietz	19	Ч	_	_	19.3
C. subflaccidum Degel.	10	Ч	_	_	0.4
Eopyrenula intermedia Coppins	30	H/o	_	_	4.1
Graphis rikuzensis (Vain.) M. Nakan.	30	Ч	_	_	0.7
<i>Gvalolechia flavorubescens</i> (Huds.) Søchting	19	СЧ	_	_	12.3
Heterodermia speciosa (Wulfen) Trevis	21.25	СЧ	_	_	2.1
Lecanora allonhana Nyl	17	СЧ	_	_	0.5
L pachyheila Hue	15	СЧ	_	0.59	5.8
Lecanora sp	18 33	U I H/o	_	0.57	5.5
Lecanora sp. 1	21	H/o			2.5
Lecanora sp. 1	21	П/0 Ц/о	—	—	2.2
Lecanora sp. 2	17		_	—	1.0
Lepraria incana (L.) Ach.	21.22	U4 11	_	—	0.4
Lepiogium burneitae Dodge.	21.33	4	_	_	1.9
L. cyanescens (Rabenn.) Korb	21.25	Ч	_	_	4.3
Lobaria kazawaensis Asahina	30	Ч	—	—	0.1
L. pulmonaria (L.) Hoffm.	30	Ч	—	-	0.2
Mikhtomia gordejevii (Tomin) S.Y. Kondr.	15.4	УT	_	2.15	4.9
Opegrapha atra Pers.	21	H/o	_	_	0.4
<i>Oxneria huculica</i> S.Y. Kondr.	8	УТ	6.25	11.30	0.9
Parmelia fertilis Müll. Arg.	16.5	УТ	—	0.98	2.2
<i>P. saxatilis</i> (L.) Ach.	13.14	УТ	1.61	2.73	8.4
<i>P. sulcata</i> Taylor	21	СЧ	_	_	2.1
Peltigera sp.	30	H/o	_	_	0.2
Pertusaria amara (Ach.) Nyl.	30	Ч	_	—	0.1
P. pertusa (Weigel) Tuck.	30	Ч	_	_	0.1
Pertusaria sp.	21	H/o	_	_	1.2
Phaeophyscia hirtuosa (Kremplh.) Essl.	10.47	УТ	41.64	41.21	51.3
Ph. hispidula (Ach.) Essl.	19	СЧ	_	0.39	0.7
Ph. rubropulchra (Degelius) Essl.	30	СЧ	_	_	0.2
Physcia alnophila (Vain.) Loht. et al.	30	СЧ	_	_	0.7
Physciella chloantha (Ach.) Essl.	5	Т	0.83	_	_
Ph. melanchra (Hue) Essl.	5.86	Т	78.45	3.91	_
Physconia detersa (Nyl.) Poelt	11.46	УТ	3.72	56.98	18.7
Ph. grumosa Kashiw. & Poelt	17	СЧ	_	4.49	13.5
Ph. kurokawae Kashiw.	11	УТ	0.21	5.92	8.0
Ramalina roesleri (Hochst. ex Schaer.) Hue	15.5	СЧ	_	_	1.2
Rinodina efflorescens Malme	30	H/o		_	0.2

Таблица 1. Биоиндикаторные показатели лишайников на коре тополя Максимовича в районе исследований Table 1. Bioindication indexes of lichens on *Populus maximowiczii* bark in the study area

Примечание. Q – токсифобность. Группы чувствительности: Т – толерантная, УТ – умеренно-толерантная, СЧ – средне-чувствительная, Ч – чувствительная, Н/о – чувствительность не определена. Прочерк – вид отсутствует.

Note. Q – toxophobicity. Sensitivity groups: T – tolerant, YT – moderately tolerant, CU – medium sensitivity, U – sensitive, H/o – sensitivity is not defined. Dash – the species is absent.

№ 9 (южный вход в ГПКиО им. Ю.А. Гагарина), максимальное – 20.14 – на площадке № 6 («детский городок» в ГПКиО им. Ю.А. Гагарина). Среднее значение І.А.Р. на площадках кластера составляет 16.55.

Кластер III объединяет наиболее удаленные от дорожной сети площадки с богатым видовым разнообразием (№ 10–15, расстояние до ближайших автодорог 140–3270 м) и более естественными условиями произрастания объектов мониторинга. На площадках этого кластера отмечено 45 видов, что почти в 4 раза превосходит количество видов, отмеченное на площадках кластера II, т.е. 95.7 % от всех видов эпифитных лишайников, произрастающих на учетных площадках. Значение I.А.Р. варьирует от 17.34 (площадка № 15 – лыжероллерная трасса спортшколы зимних видов спорта) до 49.83 (площадка № 10 – долина р. Белая); среднее значение – 30.12.

Особенности видового состава и значения индекса атмосферной чистоты (I.А.Р.) на учетных площадках по выделенным кластерам позволяют судить о разной степени антропогенной нагрузки на исследуемой территории. Площадки в зоне сильной, средней и слабой нагрузки объединились в кластеры I, II, III соответственно. На основе показателей встречаемости был посчитан коэффициент *Q* относительной токсифобности (ассоциированности). По значению коэффициента вкупе с данными приуроченности видов к зонам с разной антропогенной нагрузкой лишайники были отнесены к той или иной группе чувствительности.

В табл. 1 представлен список видов лишайников в алфавитном порядке, включающий показатель встречаемости и распределение лишайников по группам чувствительности. Виды лишайников, отмеченные только один раз, не были отнесены ни к одной из групп.

Виды толерантной группы – *Physciella* chloantha и *P. melanchra* – приурочены к площадкам кластера I (с сильной антропогенной нагрузкой) (рис. 5 а). Коэффициент токсифобности не превышает 6. Лишайники толерантной группы чувствительности устойчивы к особенностям атмосферного воздуха, характерным для городской среды, в том числе повышенному содержанию загрязнителей. Показатель встречаемости в пределах 58 %. В зоне слабой антропогенной нагрузки лишайники толерантной группы не были зарегистрированы.

Умеренно-толерантная группа включает 8 видов, которые отмечены во всех кластерах с незначительными вариациями встречаемости



Рис. 5. Внешний вид слоевища *Physciella melanchra* (а), *Phaeophyscia hirtuosa* (б), *Lecanora pachyheila* (в), *Leptogium cyanescens* (г).

Fig. 5. Thallus appearance *Physciella melanchra* (a), *Phaeophyscia hirtuosa* (б), *Lecanora pachyheila* (в), *Leptogium cyanescens* (г).

в градиенте антропогенного воздействия либо с увеличением встречаемости в зоне слабой антропогенной нагрузки. Наиболее распространенные из них – *Candelaria concolor*, *Phaeophyscia hirtuosa* (рис. 5 б), *Physconia detersa*. Коэффициент токсифобности от 8 до 16.5. В среднем суммарный показатель встречаемости 45.4 %.

Виды средне-чувствительной группы (СЧ) приурочены к кластерам II и III, объединяющим учетные площадки, испытывающие среднее и слабое антропогенное воздействие. Группа насчитывает 16 видов с коэффициентом токсифобности в диапазоне 15–30. В основном это широко распространенные лишайники: *Gyalolechia flavorubescens, Lecanora расhyheila* (рис. 5 в), *Physconia grumosa* и др. Средний показатель встречаемости вида на исследуемой территории – 6.23 %.

Чувствительная группа включает 12 видов; лишайники данной группы встречаются толь-





Fig. 6. Diagram of relation between the distance to public roads and Shannon diversity index value.

ко в зоне слабого антропогенного воздействия. Наиболее распространенные лишайники этой группы – *Collema furfuraceum* и *Leptogium cyanescens* (рис. 5 г). Хорошо развитые слоевища с апотециями были встречены только в отдаленных от города районах – в долинах рек Белая и Рогатка.

Для оценки разнообразия эпифитных лишайников на учетных площадках был посчитан индекс Шеннона, а также его нормированный вариант – индекс Пиелу. Сводная информация о значении указанных индексов, а также индекса атмосферной чистоты (I.А.Р.), количестве видов и расстоянии площадок до ближайшей асфальтированной автодороги представлена в табл. 2.

Результаты анализа значений индекса разнообразия Шеннона свидетельствуют об их прямой корреляции с расстоянием до ближайших асфальтированных автомобильных дорог, $R^2 = 0.71$ (рис. 6).

Отмеченная зависимость явно обусловлена негативным влиянием антропогенной нагрузки на возможность произрастания лишайников чувствительной и среднечувствительной групп. Вследствие этого на учетных площадках I и отчасти II кластера существенно снижено разнообразие эпифитных лишайников. Так, значение индексов Шеннона и Пиелу на учетных площадках в непосредственной близости от автодорог (кластер I, сильное антропогенное воздействие) составляет, соответственно, 1.21-1.91 и 0.29-0.47, на площадках кластера II – 1.87–2.57 и 0.46–0.63, кластера III - 2.05-4.06 и 0.5-1. Минимальное значение 1.21 отмечено на учетной площадке № 5 на расстоянии 23 м до автодороги;

Таблица 2. Показатели встречаемости и биоразнообразия эпифитных лишайников в районе исследования Table 2. Indicators of occurrence and biodiversity of epiphytic lichens in the study area

Параметр		K	Сластер	Ι			Клас	тер II				Класт	rep III		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
n	5	5	4	5	3	6	11	7	8	21	30	17	17	8	10
I.A.P.	14.64	12.05	11.21	9.40	8.46	20.14	18.81	13.96	13.28	49.83	46.20	26.27	23.71	17.36	17.34
Н	1.92	1.66	1.50	1.45	1.21	2.24	2.58	1.88	2.02	3.6	4.06	3.13	3.17	2.05	2.78
E	0.47	0.41	0.37	0.36	0.30	0.55	0.63	0.46	0.50	0.88	1.00	0.77	0.78	0.50	0.68
<i>L</i> , м	78	70	52	80	23	38	53	80	225	3070	3270	2644	620	400	140

Примечание. Параметры: *n* – количество видов, I.А.Р – индекс атмосферной чистоты, *H* – индекс Шеннона, *E* – индекс Пиелу, *L* – расстояние до пересечения с ближайшей асфальтированной дорогой. Участки: 1 – Аллея интернационалистов, 2 – сквер им. А.С. Пушкина, 3 – библиотека СахГУ, 4 – сквер Пограничников, 5 – сквер им. Г.И. Невельского, 6 – «Детский городок» ГПКиО им. Ю.А. Гагарина, 7 – оз. Нижнее ГПКиО им. Ю.А. Гагарина, 8 – территория ИМГиГ ДВО РАН, 9 – южный вход в ГПКиО им. Ю.А. Гагарина, 10 – долина р. Белая, 11, 12, 13 – долина р. Рогатка, 14 – долина р. Красносельская, 15 – лыжероллерная трасса спортшколы зимних видов спорта.

наименьшее количество видов и І.А.Р. отмечено здесь же. Максимальное значение индекса Шеннона 4.06 зафиксировано на площадке № 11, которая удалена от асфальтированного дорожного полотна на расстояние 3270 м и характеризуется наибольшим разнообразием лишайников.

Площадки № 14 и 15, относящиеся к кластеру III, отличаются невысоким разнообразием лишайников (8 и 10 видов соответственно) и средним значением І.А.Р. (17.3). Однако в их лихенобиоте отмечены 3 вида из среднечувствительной и чувствительной групп – Buellia sp., Lecanora pachyheila и Lecanora sp. для площадки 14 и Collema furfuraceum, Gyalolechia flavorubescens, Ramalina roesleri для площадки 15.

Выводы

В г. Южно-Сахалинск и его окрестностях на стволах тополя Максимовича было зарегистрировано 47 видов лишайников. Выявленные виды относятся к 8 порядкам, 14 семействам и 26 родам. Ведущие семейства по числу видов – *Physciaceae*, *Parmeliaceae* и *Teloshistaceae*.

Рассчитанный для оценки антропогенного воздействия на особенности распределения лишайников индекс атмосферной чистоты (I.A.P.) показал прямую линейную корреляцию с расстоянием учетных площадок до автодорог ($R^2 = 0.83$).

По результатам кластерного анализа распределения лишайников на учетных площадках выделено три кластера, позволяющие судить о разном уровне антропогенной нагрузки. Кластер I с наименьшими значениями I.А.Р. (8.46–14.64) объединяет площадки, испытывающие сильную антропогенную нагрузку, они находятся в непосредственной близости от густой дорожной сети. В кластер II (I.А.Р. 13.28–20.14) вошли площадки, расположенные в зеленой зоне города. Кластер III (I.А.Р. 17.34–49.83) объединяет наиболее удаленные от дорожной сети площадки с богатым видовым разнообразием и более естественными условиями жизнедеятельности объектов мониторинга. На площадках этого кластера отмечено 95.7 % всех видов эпифитных лишайников, произрастающих на учетных площадках.

На основании приуроченности лишайников к площадкам с разным уровнем антропогенной нагрузки и коэффициента относительной токсифобности лишайники отнесены к четырем группам чувствительности. Виды толерантной группы типичны для городской среды и не зарегистрированы на площадках со слабой антропогенной нагрузкой, виды умеренно-толерантной группы отмечены во всех кластерах, виды средне-чувствительной группы – в кластерах с площадками, испытывающими среднее и слабое антропогенное воздействие. Чувствительная группа включает виды, встречающиеся только в зоне слабого воздействия.

Индексы разнообразия Шеннона и Пиелу показывают прямую корреляцию с расстоянием до асфальтированных автодорог ($R^2 = 0.71$), что обусловлено негативным влиянием антропогенной нагрузки на условия произрастания чувствительных и среднечувствительных лишайников и, как следствие, снижением разнообразия лихенобиоты на площадках с сильным и средним антропогенным воздействием. Индексы достигают максимального значения на одной из площадок, наиболее удаленных от автодорог (долина р. Белая; 4.06 и 1 соответственно), минимального – на площадке, приближенной к автодороге (сквер им. Г.И. Невельского; 1.21 и 0.29 соответственно).

С высокой долей вероятности полученные данные свидетельствуют о том, что причиной уменьшения биоразнообразия и встречаемости эпифитных лишайников на коре тополя Максимовича является атмосферное загрязнение, вызванное длительным воздействием автотранспорта.

Список литературы

1. Бязров Л.Г. 2002. Лишайники в экологическом мониторинге. М.: Науч. мир, 336 с.

2. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Сахалинской области в 2020 году. Мин-во экологии Сахалинской области. Южно-Сахалинск: Эйкон, 2021. 179 с.

3. Ежкин А.К., Галанина И.А. **2016.** Эпифитные лишайники лиственных деревьев города Южно-Сахалинск и особенности их распределения по степени чувствительности к антропогенному воздействию. *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*, 4: 95–107.

4. Ерофеева И.А., Сергеева И.В. **2014.** Использование эпифитных лишайников в биоиндикации состояния окружающей среды. *Аграрный научный журнал.* № 10, 2014. С. 18-20.

5. Земцова А.И. 1968. Климат Сахалина. Л.: Гидрометеоиздат, 197 с.

6. Корзников К.А., Ежкин А.К. **2019.** Ильмовые и ясеневые леса в долине р. Тымь на о-ве Сахалин. *Бюл. Ботанического сада-института ДВО РАН*, 22: 1–14. doi:10.17581/bbgi2201

7. Определитель лишайников СССР. Вып. 2. Морфология, систематика и географическое распространение (ред. А.Н. Окснер). 1974. Л.: Наука, 284 с.

8. Сабиров Р.Н. **2017.** О тополевых насаждениях г. Южно-Сахалинск. *Вестник Сахалинского музея*, Южно-Сахалинск, 24: 314–323

9. Флора лишайников России: Биология, экология, разнообразие, распространение и методы изучения лишайников. **2014.** (Авт.: М.П. Андреев, Т. Ахти, А.А. Войцехович, Л.В. Гагарина, Ю.В. Герасимова, Д.Е. Гимельбрант, Е.А. Давыдов, Л.А. Конорева, Е.С. Кузнецова, Т.В. Макрый и др.). М.; СПб.: Тов-во науч. изд. КМК, 392 с.

10. Adjiri F., Ramdani M., Lograda T. **2019.** Relationship between lichen diversity and air quality in urban region in Bourdj Bou Arriridj, Algeria. *Biodiversitas J. of Biological Diversity*, 20(8): 2329–2339. https://doi.org/10.13057/biodiv/d200831

11. Das P., Joshi S., Rout J., Upreti D.K. **2013.** Lichen diversity for environmental stress study: Application of index of atmospheric purity (IAP) and mapping around a paper mill in Barak Valley, Assam, northeast India. *Tropical Ecology*, 54(3): 355–364.

12. Foucard T. **2001.** *Svenska skorplavar och svampar som växer på dem*. Stockholm: Stenströms bokförlag Interpubl., 392 p.

13. Herzig R., Schindler C., Urech M., Rihm B., Lötscher H., Thomann G. **2020.** Recalibration and validation of the Swiss lichen bioindication methods for air quality assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(23): 28811–28812. doi:10.1007/s11356-020-09732-x

14. Kaganov V.V., Kordukov A.V., Ezhkin A.K. **2019.** Monitoring of recreational areas of Yuzhno-Sakhalinsk and its surroundings. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324(2019): 012034. doi:10.1088/1755-1315/324/1/012034

15. LeBlanc F., De Sloover J. **1970.** Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphtic lichens and mosses in Montreal. *Canadian J. of Botany*, 48: 1485–1496.

https://doi.org/10.1139/b70-224

16. Pielou E.C. **1966.** Shannon's formula as a measure of species diversity: its use and misuse. *The American Naturalist*, 100: 463–465. https://doi.org/10.1086/282439

17. Pielou E.C. 1975. Ecological diversity. New York: John Wiley & Sons, 165 p.

18. Shannon C.E., Weaver W.W. **1963.** *The mathematical theory of communications*. Urbana: University of Illinois Press, 117 p.

19. Tanona M., Czarnota P. **2020.** Index of Atmospheric Purity reflects the ecological conditions better than the environmental pollution in the Carpathian forests. *J. of Mountain Science*, 17(11). https://doi.org/10.1007/s11629-020-6266-1

20. Ward J.H. **1963.** Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. of the American Statistical Association*, 58: 236–244. https://doi.org/10.2307/2282967

References

1. Byazrov L.G. **2002.** *Lishayniki v ekologicheskom monitoringe* [*Lichens in ecological monitoring*]. Moscow: Nauch. mir, 336 p.

2. Doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Sakhalinskoy oblasti v 2020 godu [Report on the state and protection of the environment in the Sakhalin Region in 2020]. Min-vo ekologii Sakhalinskoy oblasti. [The Ministry of ecology of the Sakhalin Region]. Yuzhno-Sakhalinsk: Eykon, 2021. 179 p.

3. Ezhkin A.K., Galanina I.A. **2016.** Epiphytic lichens of deciduous trees in the city of Yuzhno-Sakhalinsk and specifics of their distribution by sensitivity to the anthropogenic impact. *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra DVO RAN = Bull. of the North-East Scientific Center FEB RAS*, 4: 95–107.

4. Erofeeva I.A., Sergeeva I.V. **2014.** The use of epiphytic lichens in bio-indication of the environment. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal* = [*Agrarian Scientific Journal*], 10: 18–20.

5. Zemtsova A.I. 1968. [The climate of Sakhalin]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 197 p.

6. Korznikov K.A., Ezhkin A.K. **2019.** Ash and elm forests of the Tym' river valley, Sakhalin Island. *Byul. Botanicheskogo sada-instituta DVO RAN* = [*Bull. of the Botanical Garden-Institute FEB RAS*], 22: 1–14. https://doi.org/10.17581/bbgi2201

7. [*Identification guide to the lishens of USSR*]. Iss. 2. [*Morphology, taxonomy and geographical distribution*] (ed. A.N. Oksner). **1974.** Leningrad: Nauka, 284 p.

8. Sabirov R.N. **2017.** [On the populus planting in Yuzhno-Sakhalinsk]. *Vestnik Sakhalinskogo muzeya* [*Bulletin of the Sakhalin museum*]. Yuzhno-Sakhalinsk, 24: 314–323.

9. Flora of lichens in Russia: Biology, ecology, diversity, distribution and the study methods. 2014. (Authors: M.P. Andreev, T. Akhti, A.A. Voytsekhovich et al.). Moscow; Saint Petersburg: Tov-vo nauch. izd. KMK, 392 p.

10. Adjiri F., Ramdani M., Lograda T. **2019.** Relationship between lichen diversity and air quality in urban region in Bourdj Bou Arriridj, Algeria. *Biodiversitas J. of Biological Diversity*, 20(8): 2329–2339. https://doi.org/10.13057/biodiv/d200831

11. Das P., Joshi S., Rout J., Upreti D.K. **2013.** Lichen diversity for environmental stress study: Application of index of atmospheric purity (IAP) and mapping around a paper mill in Barak Valley, Assam, northeast India. *Tropical Ecology*, 54(3): 355–364.

12. Foucard T. **2001.** *Svenska skorplavar och svampar som växer på dem.* Stockholm: Stenströms bokförlag Interpubl., 392 p.

13. Herzig R., Schindler C., Urech M., Rihm B., Lötscher H., Thomann G. **2020.** Recalibration and validation of the Swiss lichen bioindication methods for air quality assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(23): 28811–28812. doi:10.1007/s11356-020-09732-x

14. Kaganov V.V., Kordukov A.V., Ezhkin A.K. **2019.** Monitoring of recreational areas of Yuzhno-Sakhalinsk and its surroundings. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324(2019): 012034. doi:10.1088/1755-1315/324/1/012034

15. LeBlanc F., De Sloover J. **1970.** Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Canadian J. of Botany*, 48: 1485–1496. https://doi.org/10.1139/b70-224

16. Pielou E.C. **1966.** Shannon's formula as a measure of species diversity: its use and misuse. *The American Naturalist*, 100: 463–465. https://doi.org/10.1086/282439

17. Pielou E.C. 1975. Ecological diversity. New York: John Wiley & Sons, 165 p.

18. Shannon C.E., Weaver W.W. **1963.** *The mathematical theory of communications*. Urbana: University of Illinois Press, 117 p.

19. Tanona M., Czarnota P. **2020.** Index of Atmospheric Purity reflects the ecological conditions better than the environmental pollution in the Carpathian forests. *J. of Mountain Science*, 17(11). https://doi.org/10.1007/s11629-020-6266-1

20. Ward J.H. **1963.** Hierarchical grouping to optimize an objective function. J. of the American Statistical Association, 58: 236–244. https://doi.org/10.2307/2282967

Об авторах

About the Authors

КАГАНОВ Владимир Владимирович (https://orcid. org/0000-0003-1444-9813), аспирант, старший инженер лаборатории экологии растений и геоэкологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, младший научный сотрудник Сахалинского филиала ботанического сада-института ДВО РАН, Южно-Сахалинск, vladimirkaganov@mail.ru

КОРДЮКОВ Александр Владимирович (https://orcid. org/0000-0002-1430-1627), кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории береговых геосистем, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, a.kordyukov@imgg.ru

ЕЖКИН Александр Константинович (https://orcid. org/0000-0002-2242-2250), кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии растений и геоэкологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, ezhkin@yandex.ru KAGANOV Vladimir V. (https://orcid.org/0000-0003-1444-9813), Postgraduate, Senior Engineer, the Laboratory of plant ecology and geoecology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk; Junior Researcher, Sakhalin Branch of the Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, vladimirkaganov@mail.ru

KORDYUKOV Alexander V. (https://orcid.org/0000-0002-1430-1627), Cand. Sci. (Biology), Researcher, the Laboratory of coastal geosystems, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, a.kordyukov@imgg.ru

EZHKIN Alexander K. (https://orcid.org/0000-0002-2242-2250), Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, the Laboratory of plant ecology and geoecology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, ezhkin@yandex.ru Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 531.011+539.3

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.439-447

Детерминированные и стохастические колебания фрактального типа при охлаждении расплава

© 2021 И. Б. Краснюк¹, А. Е. Заболотин^{*2}

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАНУ, Донецк, Украина ²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: a.zabolotin@imgg.ru

Резюме. Рассматривается «однофазная» модель кристаллизации расплава в представлении Пенроуза– Файфа для распределений температуры при неизотермических условиях. Граничные условия предполагаются нелинейными и динамическими, т.е. характеризуют скорость релаксации поверхностного параметра порядка. При этом краевые условия зависят от частоты зародышеобразования новой фазы и скорости кристаллизации расплава в (при)поверхностных слоях изложницы. Предложен метод прогнозирования возникновения упорядоченных пространственно-временных (квази)кристаллических структур фрактального типа кристаллической фазы в жидком расплаве. Поверхностный параметр порядка определяет механические и деформационные свойства образца в зависимости от температуры твердого тела.

Ключевые слова: аморфный расплав, разностное уравнение с квазипериодическими возмущениями, бифуркации удвоения периода

Deterministic and stochastic oscillations of fractal type during cooling of the melt

Igor 'B. Krasnyuk¹, Andrey E. Zabolotin^{*2}

¹Donetsk Institute for Physics and Engineering named after A.A. Galkin of NASU, Donetsk, Ukraine ²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: a.zabolotin@imgg.ru

Abstract. A "single-phase" model of melt crystallization in the Penrose–Fife representation for temperature distributions under non-isothermal conditions is considered. The boundary conditions are assumed to be nonlinear and dynamic, i.e. they characterize the relaxation rate of the surface order parameter. In this case, the boundary conditions depend on the frequency of new phase nucleation and the rate of a melt crystallization in the (near-)surface layers of the mold. A method is proposed for predicting the appearance of ordered spatiotemporal (quasi-)crystalline structures of the fractal type of the crystalline phase in a liquid melt. The surface order parameter determines the mechanical and deformation properties of the sample depending on the temperature of the solid.

Keywords: amorphous melt, difference equation with quasi-periodic perturbations, period-doubling bifurcations

Для цитирования: Краснюк И.Б., Заболотин А.Е. Детерминированные и стохастические колебания фрактального типа при охлаждении расплава. Геосистемы переходных зон, 2021, т. 5, № 4, с. 439–447. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.439-447

Введение

В данной работе мы рассматриваем «однофазную» модель возникновения и дальнейшей эволюции зародышей кристаллической фазы в (квази)одномерном жидком расплаве, который ограничен двумя плоскими стенками *For citation:* Krasnyuk I.B., Zabolotin A.E. Deterministic and stochastic oscillations of fractal type during cooling of the melt. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. (In Russ., abstr. in Engl.). 439–447. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.439-447

[Caginalp, Xie, 1993]. На стенках изложницы для параметра порядка задаются нелинейные граничные условия вида

$\phi_{t} = \Phi(\phi, T),$

где (в частных случаях) температура T рассматривается как параметр. При этом функция Φ

может быть определена аналитически при условии, что известен закон образования новой фазы $\phi(0, t)$ на стенке изложницы x = 0, ограничивающей расплав. Доля образовавшейся новой фазы $\phi(0, t)$ определяется на основе уравнения Колмогорова [Колмогоров, 1937] и зависит, как известно, от частоты зародыше-образования J(0, t) и скорости роста кристалла V(0, t).

Модельные уравнения, описывающие долю кристаллической фазы $\phi(x, t)$ при неравномерном распределении температуры T(x, t), выбираются для однофазной модели кристаллизации в форме Пенроуза–Файфа [Fife, Penrose, 1995; Penrose, Fife, 1993; Krasnyuk et al., 2018]. Решения так поставленной краевой задачи описывают процесс возникновения упорядоченных зародышей кристаллической фазы релаксационного (рис. 1) и турбулентного типа. При этом период и число колебаний на периоде зависят от функции $\Phi(k, \mu)$ в граничных условиях (точнее, от суперпозиции таких функций, поскольку нелинейные граничные условия задаются на каждой из плоских стенок изложницы). Параметры k и µ определяются по формулам $\mu = -\frac{U_a}{k_B T}$, $k = -\frac{U_{cr}}{k_B T}$, где Ua – энергия активации перехода атома через границу раздела фаз (границу изложницы), U_{cr} – работа образования критического зародыша на стенке, ограничивающей расплав; k_в – постоянная Больцмана.

Мы покажем процесс образования структур кристаллической фазы в расплаве как каскад-

ный процесс возникновения зародышей все уменьшающихся размеров. При этом размеры уменьшающихся кластеров (для двумерной геометрии) характеризуются универсальным отношением амплитуд (в одномерном случае) или радиусов кластеров кристаллической фазы (в двумерном случае). В реальных ситуациях каскадный процесс образования структур в конце концов обрывается из-за присутствия в системе вязкости [Колмогоров, 1941] или других параметров, приводящих к диссипации энергии.

Что касается сценария возникновения упорядоченных зародышей кристаллической фазы релаксационного типа в расплаве (рис. 1) при неизотермических условиях, то такой сценарий моделирует, например, формирование на поверхности кремния объемных периодических структур субмикронных размеров, изучение которых представляет интерес для разработки микроэлектронных устройств [Асташинский и др., 2002]. Такие системы рассматриваются в работах [Эйдельман, 1995; Углов и др., 2001], где исследуется механизм формирования структур при быстрой кристаллизации расплавленного слоя на фоне различного рода неустойчивостей. В отличие от [Эйдельман, 1995; Углов и др., 2001], мы рассматриваем медленную кристаллизацию, однако механизмы возбуждения таких неустойчивостей предполагаются сильно нелинейными, что и приводит в результате к возникновению (квази)кристаллических асимптотически периодических структур, изображенных на рис. 1. В отличие от результатов [Эйдельман, 1995; Углов и др., 2001], получен-



Рис. 1. Изменение средней безразмерной концентрации анортита An в затвердевшей породе в процессе кристаллизации расплава. Релаксационные колебания сопровождаются «выбросами» в окрестности разрывов. Такого рода сходимость последовательности непрерывных функций к многозначной функции получила название явления Гиббса. Здесь V – скорость распространения бегущей волны (характерные изменения скорости кристаллизации составляют $\approx 10^{-7}$ м/с), β_2 , β_3 – «концентрации» одной из компонент бинарной смеси после расслоения расплава при охлаждении, β_3 – неустойчивое состояние магматического расплава. Функция f описывает одну из двух встречных бегущих волн. Сумма таких волн представляет собой искомую концентрацию (или параметр порядка).

Fig. 1. Change in the average dimensionless concentration of anorthite An in the solidified rock during the melt crystallization. Relaxation oscillations are accompanied with "emissions" in the vicinity of discontinuities. This kind of convergence of sequence of continuous functions to a multivalued function is called the Gibbs phenomenon. Here V – the propagation velocity of a travelling wave (character changes in the crystallization rate are $\approx 10^{-7}$ m/s), β_2 , β_3 – the "concentrations" of one of the components of binary mixture after the melt layering during its cooling, β_3 – unstable state of the magnatic melt. Function f describes one of two counter-travelling waves. The sum of these waves is a desired concentration (or the order parameter).

ные в данной работе периодические структуры субмикронных масштабов являются не стационарными, а нестационарными пространственно-временными структурами. Эти структуры имеют вид простых импульсных бегущих волн (предполагается, что число ударных слоев конечно). Бегущую волну называем простой, если фронт волны распространяется с постоянной скоростью. Если скорость волны положительна, такую волну называем прямой.

Постановка задачи

Известно, что существуют структурные различия в ближней упорядоченности жидкости и кристалла [Скрипов, Коверда, 1984]. Мы рассмотрим бинарный сплав, который есть смесь двух материалов А и В с концентрацией $c(x, t) \in (0, 1)$, представляющей собой долю материала А в бинарной смеси. Соответствующая фазовая диаграмма для «идеальной» бинарной смеси или сплава показана в работе [Александров, 1989]. Интригующим свойством этой фазовой диаграммы является то, что жидкая и твердая фазы не разделены единственной кривой, а состоят из двух кривых (ликвидуса и солидуса), которые пересекаются при температуре плавления $[T_m]^T$ для чистого (B) материала (при c = 0). Мы предположим в дальнейшем, что при малых с эти кривые представляют собой прямые линии. Отсюда вытекает (рис. 2), что существует поверхность раздела при равновесной температуре $T_{_E}$ между концентрациями *с*_{*L*} и *с*_{*S*} жидкой и твердой фазы соответственно [Александров, 1989].



Рис. 2 Схема модели двухфазной зоны: (1) жидкость, (2) активная область двухфазной зоны, (3) область медленного роста твердой фазы в слабой гетерогенной зоне (в почти идеальном расплаве), (4) затвердевшая порода (диопсид–анортит Di–An) [Александров, 1989].

Fig. 2. Scheme of the model of a two-phase zone: (1) fluid, (2) active area of a two-phase zone, (3) area of slow growth of the solid phase in a weak heterogeneous zone (in an almost ideal melt), (4) solidified rock (diopside-anorthite Di-An) [Alexandrov, 1989].

Мы рассмотрим «однофазную» модель кристаллизации расплава (плавления кристалла), не учитывая диффузию примесей в твердой фазе, которые предполагаются достаточно малыми. Отметим также, что при достаточно малых можно не учитывать зависимость внутреннего (скрытого) тепловыделения от концентрации (см. ниже). Далее мы рассмотрим параметр порядка $\phi(x, t)$ в рамках модели фазового поля [Беленький, 1989; Ананин и др., 2006], такой, что $\phi = 0$ в твердой фазе и $\phi = 1$ в жидкой фазе. Тогда эволюционные уравнения для скоростей изменения параметра порядка $(\phi)_{\bar{t}}$ и температуры в жидкой фазе $T_{\bar{t}}$ могут быть записаны в виде [Беленький, 1989; Ананин и др., 2006]

$$cT_{\bar{t}} + \bar{w}(\phi)_{\bar{t}} = \nabla D(\phi, T) \nabla T, \qquad (1)$$

$$k_0(\phi, T)\phi_{\bar{t}} = k_1 \nabla^2 \phi - \frac{1}{T} \frac{\partial f(\phi, T)}{\partial \phi}, \quad (2)$$

где $x \in R^1$ и $t \in R^1$ суть пространственная и временная переменные; c – удельная теплоемкость, D – коэффициент теплопроводности, функция $k_0(\phi,T)$ характеризует скорость релаксации параметра порядка к положению равновесия, k – коэффициент подвижности атомов, $f(\phi,T)$ – свободная энергия Гельмгольца, которая будет определена ниже.

Потенциальная энергия $\overline{w}(\phi)$ определяется через внутреннюю энергию $\overline{e}(\phi,T)$ по формуле [Беленький, 1989]

где

$$\overline{w}(\phi) = -a\phi^2 + b\phi + d.$$

 $\bar{e}(\phi,T) = \frac{\partial(f/T)}{\partial(1/T)} = \bar{w}(\phi) + cT,$

Здесь a, b и d – произвольные постоянные, которые имеют размерность энергии.

Введем безразмерные переменные $x = \bar{x}/L$ и $t = \bar{t}D/cL^2$, где L – некоторый характерный макроразмер системы. Тогда (как показано в [Беленький, 1989]) система (1), (2) допускает редукцию к безразмерным уравнениям

$$u_t + vw(\phi)_t = u_{xx},\tag{3}$$

$$\alpha \epsilon^2 \phi_t = \epsilon^2 \phi_{xx} + F(\phi, u), \qquad (4)$$

где $\epsilon^2 = k/L^2 vc$ и $\alpha = k_0 D/k_1 c$; v – некоторый безразмерный параметр; $u = (T/T_m) - 1$, где T_m – температура плавления.

Здесь
$$w(\phi) = \frac{\overline{w}(\phi)}{vcT_m}, \quad F(\phi, u) = \frac{1}{vcT(u)} \frac{\partial}{\partial \phi} f(\phi, T(u)),$$

а параметр v определяется таким образом, что

 $\frac{\partial F}{\partial \phi}(\phi_c, 0) = 1$, где $\phi_c = h_0(T) \epsilon (h(T), h+(T))$ представляет собой локальный максимум функции $f(\phi, T)$. При этом локальные минимумы определяются функциями $\phi = h - (T)$ и $\phi = h+(T)$ [Fife, Penrose, 1995; Penrose, Fife, 1993].

Целью данной работы является исследование асимптотического поведения решений уравнений (3), (4) с граничными условиями вида

$$\phi_t = F_1(T)|_{x=0}, \qquad \phi_t = F_2(T),$$
 (5)

где $F_{\rm 1}$ и $F_{\rm 2}$ – заданные функции, и граничными условиями

$$\phi_x = 0|_{x=0}, \qquad \phi_x = 0$$
 и (6)

$$T_{r} = 0|_{r=0}, \quad T_{r} = 0.$$
 (7)

Граничные условия (6) и (7) имеют простой физический смысл. Физическая интерпретация краевых условий (5) состоит в следующем: известно, что кинетика фазовых превращений описывается на основе уравнения Колмогорова [Асташинский и др., 2002; Эйдельман, 1995]. В рамках такого подхода доля образовавшейся новой фазы выражается через частоту зародышеобразования J(0,t), а скорость роста V(0,t), по формуле

$$\phi(x,t) = 1 - \exp\left\{-\beta_0 \int_{t_1}^t J(\tau) \left(\int_{\tau}^t V(t')t'\right)^n d\tau\right\}, (8)$$

где β_0 – коэффициент формы, t_1 – время начала зародышеобразования при x=0. Показатель степени может принимать значения n=1, 2, 3. Значение n=1 соответствует одномерному механизму роста.

По классической теории гомогенной нуклеации [Шарковский, 1964; Шарковский и др., 1985] частота зародышеобразования определяется выражением

$$J(t) = N \frac{k_B}{\hbar} \exp\left(-\frac{H_a}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{W_{cr}}{k_B T}\right), \quad (9)$$

где N – число атомов в единице «объема» метастабильной фазы (при n=2 – число атомов на единицу поверхности), H_a – энергия активации перехода атома через границу раздела фаз, W_{cr} – работа образования критического зародыша, \hbar – постоянная Планка.

Далее, согласно теории кристаллизации, кристаллы растут по-разному в зависимости от состояния поверхности граней. Если грань растущего кристалла перемещается однородно (нормально к самой себе), то скорость роста грани кристалла в этом случае выражается формулой [Шарковский и др., 1986]

$$V(t) = a \frac{k_B}{\hbar} \exp\left(-\frac{H_a}{k_B T}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{L^*}{k_B T_m} \frac{\Delta T}{T}\right)\right], (10)$$

где L^* - теплота плавления на один атом; $\Delta T = T - T_m$ – величина перегрева монокристалла при плавлении или $\Delta T = T_m - T$ – величина переохлаждения расплава при кристаллизации, a – межатомное расстояние (высота монослоя).

Предположим, что выполняется неравенство

$$\frac{\Delta T}{T} \ll 1,\tag{11}$$

т.е. мы находимся в окрестности линии плавления на фазовой диаграмме в работах [Fife, Penrose, 1995; Penrose, Fife, 1993].

Тогда формулу (10) можно записать в виде

$$V(0,t) = a \frac{k_B T}{\hbar} \exp\left(-\frac{U_a}{k_B T}\right) \frac{L^*}{k_B T_m} \frac{\Delta T}{T}.$$
 (12)

Далее, в силу малости скорости роста V(0,t), формулу (8) можно записать в виде

$$\phi(0,t) = \beta_0 \int_{t_1}^t J(0,\tau) \left[\int_{\tau}^t V(0,t') dt' \right] d\tau \quad (13)$$

при n=1. Из (13) и правила дифференцирования интегралов с переменным верхним пределом и интегралов, зависящих от параметра, вытекает, что

$$\phi_t(0,t) = \beta_0 V(0,t) \int_{t_1}^t J(0,\tau) d\tau. \quad (14)$$

Пусть выполняются неравенства

$$\frac{U_a}{k_B T} \ll 1, \quad \frac{W_c}{k_B T} \ll 1. \tag{15}$$

Тогда из (15) вытекает, что соотношение (9) можно записать в виде

$$J(0,t) = N \frac{k_B T}{\hbar}.$$
 (16)

В результате из (16) и (14) получаем соотношение

$$\phi_t(0,t) = \beta_0 a N \frac{k_B}{\hbar^2} L^* u(0,t) \int_{t_1}^t (u(0,\tau) + 1) d\tau. (17)$$

Понятно, что функция $\phi_t(0, t)$ не может возрастать до бесконечности при $t \to \infty$, поэтому в формуле (17) мы должны выполнить «обрезание» по характерному временному масштабу t_T изменения температуры $u(0,\tau)$. В результате модифицированную версию формулы (17) можно записать в виде

$$\phi_t(0,t) = Au(0,t) \int_{t_1}^{t_T} (u(0,\tau)+1)d\tau,$$
 (18)
где $A = \beta_0 a N k_B L^* / \hbar^2.$

Введем обозначение

$$< u(0,\tau) >= \frac{1}{t_T - t_1} \int_{t_1}^{t_T} (u(0,\tau) + 1) d\tau$$

Тогда соотношение (18) можно записать в виде

$$\phi_t(0,t) = A(t_T - t_1) [\langle u(0,\tau) \rangle + 1) u(0,t).$$
(19)

Теперь для иллюстрации метода вместо граничных условий (7) рассмотрим краевые условия

$$T_{xx}|_{x=0} = 0.$$
 (20)

Тогда из уравнения (3) следует, что для гладких решений должно выполняться требование

$$u = -vw(\phi)|_{x=0}.$$
 (21)

В результате из (21) и (19) вытекает, что граничное условие при x = 0 можно записать в виде

$$\phi_t(0,t) = \tilde{A}w(\phi(0,t)), \qquad (22)$$

где $\tilde{A} = -A(t_T - t_1)(\langle u(0,\tau) \rangle + 1)v$. Аналогичное граничное условие можно записать и при x = L.

Таким образом, мы дали простейшую физическую интерпретацию граничных условий (5) в случае слабого зародышеобразования и малой скорости кристаллизации расплава. В общем случае физическая интерпретация нелинейных граничных условий аналогична.

Редукция модельной задачи к уравнению волнового типа для параметра порядка

Простейшая форма функции плотности свободной энергии получена в приложении к статье [Вул и др., 1984] и в размерной форме может быть записана в следующем виде:

$$f = f_0 \left[\frac{T}{4T_m} (\phi^2 - 1)^2 + \left(\frac{T}{T_m} - 1 \right) a(\phi + 1)^2 \right] + cT \log \frac{T}{T_m}$$
(23)

где параметр f_0 имеет размерность плотности энергии, а параметр *а* является безразмерным. Согласно определению (23), функция

 $F(\phi, 0) = -\frac{f_0}{vcT_m}\phi(\phi^2 - 1)$, поэтому определение параметра *v* по формуле $\frac{\partial F}{\partial \phi}(\phi_c, 0) = 1$ приводит к равенству

$$f_0 = vcT_m. \tag{24}$$

Определим

$$w(\phi) = \frac{\overline{w}(\phi)}{\nu c T_m}, \ F(\phi, u) = -\frac{1}{\nu c T(u)} \frac{\partial}{\partial \phi} f(\phi, T(u)).$$
(25)

Тогда из (25) следует, что равенство (23), в силу определения (24), может быть представлено в виде

$$F(\phi, u) = \frac{1}{2}\phi(1 - \phi^2) + 2a\frac{u}{u+1}(\phi+1).$$
(26)

Разложим функцию $F(\phi, u)$ в ряд Тейлора в некоторой точке (ϕ_*, u_*) в линейном приближении таким образом, что

$$F(\phi, u) = F(\phi_*, u_*) + \frac{1}{2}(1 - 3\phi_*^2)(\phi - \phi_*) + 2a\frac{u_*}{u_* + 1}(\phi - \phi_*) + 2a\frac{\phi_*}{(u_* + 1)^2}(u - u_*).$$
(27)

Выполним замену: $\phi = \phi - \phi_*$, $\bar{u} = u - u_*$:

$$\lambda = \frac{1}{2}(1 - 3\phi_*^2) + 2a\frac{u_*}{u_* + 1}, \quad \beta = 2a\frac{(\phi_* + 1)}{(u_* + 1)^2}$$

Тогда систему уравнений (3), (4) можно записать в виде

$$\bar{u}_t + \nu w'(\phi_*)\bar{\phi}_t = \bar{u}_{xx},\tag{28}$$

$$\alpha \epsilon^2 \bar{\phi}_t = \epsilon^2 \bar{\phi}_{xx} + \lambda \bar{\phi} + \beta \bar{u} + F(\phi_*, u_*). \tag{29}$$

Выполним замену $\bar{u} \mapsto \bar{u} + \lambda^{-1}F(\phi_*, u_*)$ (в дальнейшем верхнюю черту в обозначениях будем опускать) и запишем уравнения (28), (29) в виде

$$u_t + \nu w'(\phi_*)\phi_t = u_{xx},\tag{30}$$

$$\alpha \epsilon^2 \phi_t = \epsilon^2 \phi_{xx} + \lambda \phi + \beta u. \tag{31}$$

Тогда нетрудно видеть, что из (30) и (31) вытекает следующее уравнение:

$$\alpha \epsilon^2 \phi_{tt} + \lambda \phi_{xx} = (\lambda - \beta \nu w'(\phi_*))\phi_t + \epsilon^2 (1+\alpha)\phi_{txx} - \epsilon^2 \phi_{xxxx}.$$
(32)

Мы ограничимся исследованием случая, когда выполняется неравенство $\lambda < 0$, что (согласно определению λ) отвечает выполнению неравенства

$$|u| > 1/\sqrt{3}$$
. (33)

Неравенство (33) выполняется правее точки максимума при $\phi_{max} < \phi < 1$ и левее точки минимума при $-1 < \phi < \phi_{min}$ [Fife, Penrose, 1995; Penrose, Fife, 1993] и означает, что мы имеем дело либо со слабо расплавленным кристаллом, либо с сильно закристаллизовавшимся охлажденным расплавом.

В этом случае в уравнении (32) слева мы имеем волновой оператор и, следовательно, решение уравнения можно искать в виде

$$\phi(x,t) = f(t + x/V) + g(t - x/V), \quad (34)$$

где *f* и *g* – произвольные функции, а параметр

$$V > 0$$
 определяется равенством $V = \sqrt{-\frac{\lambda}{\alpha \epsilon^2}}$.

Тогда подстановка функции, определяемой равенством (34), в уравнение (32) приводит

к следующему уравнению:

$$\phi_t + a_1 \phi_{txx} + a_2 \phi_{xxxx} = 0, \tag{35}$$

где
$$a_1 = \frac{\epsilon^2 (1+\alpha)}{\lambda - \beta \nu w'(\phi_s)} V^2$$
, $a_2 = -\frac{\epsilon^2}{\lambda - \beta \nu w'(\phi_*)} V^4$.

Из (35) вытекают уравнения

$$\phi_{\zeta} + a_1 \phi_{\zeta\zeta\zeta} + a_2 \phi_{\zeta\zeta\zeta\zeta} = 0, \qquad (36)$$

$$\phi_{\eta} + a_1 \phi_{\eta\eta\eta} + a_2 \phi_{\eta\eta\eta\eta} = 0. \tag{37}$$

Из (36) и (37), в свою очередь, интегрированием этих уравнений вдоль характеристик dx/dt = V и dx/dt = -V, соответственно, от значения $\zeta_0 = t + l/v$ до значения $\zeta_1 = t$ и от точки $\eta = t$ до точки $\eta = t - l/v$ нетрудно получить следующие функциональные соотношения:

$$f(t + l/v) = f(t) + Y_1(t),$$
 (38)

$$g(t) = g(t - l/v) + Y_1(t),$$
 (39)

где $Y_1(t)$ и $Y_2(t)$ суть решения уравнения

$$Y_{k'}(t) + a_1 Y_{k''}(t) + Y_{k'''}(t) = 0, k = 1,2 \quad (40)$$

с различными начальными условиями. Решения уравнения (40) имеют вид

$$Y(t) = C_1 e^{(A+B)t} + C_2 e^{-\frac{(A+B)}{2}t} \sin\left\{\left(\frac{A-B}{2}\right)\sqrt{3}t\right\} + C_3 e^{-\frac{(A+B)}{2}t} \cos\left\{\left(\frac{A-B}{2}\right)\sqrt{3}t\right\},$$
(41)

где *С*₁,..., *С*₃ – произвольные постоянные.

Из (38) и (39) вытекают функциональные соотношения

$$f'(t+l/v) = f'(t) + Y_{1'}(t), \qquad (42)$$

$$-g'(t) = -g'(t - l/v) - Y_{2'}(t).$$
(43)

Далее из (42) и (43) вытекает соотношение

$$f'(t+l/v) + g'(t-l/v) = f'(t) + g'(t) + Y_{1'}(t) - Y_{2'}(t).$$
(44)

Далее нетрудно проверить, что в представлении решения (41) параметры А и В определяются по формулам

$$A = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}, A = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}, \quad (45)$$

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2, \ p = a_1, \ q = a_2.$$
 (46)

Поскольку $a_1 \sim v^2$ и $a_2 \sim v^4$ по определению, то из (45) и (46) следует, что постоянные А и В сколь угодно малы, если скорость v > 0 сколь угодно мала. Тогда при достаточно малых скоростях фронта кристаллизации расплава в функциональном соотношении (44) последним слагаемым можно пренебречь, что приводит к равенству

$$f'(t+l/v) + g'(t-l/v) =$$

= F₁(f(t+l/v) + g(t-l/v)), (47)

$$f'(t) + g'(t) = F_2(f(t) + g(t)).$$
 (48)

Из (47) и (48), в свою очередь, вытекает, что равенство (46) допускает редукцию к соотношению

$$F_1(f(t+l/v) + g(t-l/v)) = F_2(f(t) + g(t)).$$
(49)

Далее из однородных граничных условий Неймана для параметра порядка вытекают соотношения

$$f(t) = g(t) + c_1,$$

$$f(t + l/v) = g(t - /v) + c_2,$$
(50)

где c_1 и c_2 – постоянные, которые в дальнейшем положим равными нулю. Тогда из (50) вытекает, что равенство (49) можно записать в виде

$$F_1(2f(t+l/v)) = F_2(2f(t)).$$
(51)

Переобозначим $f \mapsto 2f$ и запишем равенство (51) в виде

$$f(t+l/v) = F_1^{-1}(F_2(f(t)),$$
(52)

где F_1^{-1} обратная к F_1 функция. Положим $\Phi = F_1^{-1} \circ F_2$, где (°) – суперпозиция соответствующих функций.

В результате равенство (52) можно записать в виде

$$f(t + l/v = \Phi(f(t)).$$
 (53)

Итак, мы получили разностное уравнение с непрерывным временем. Решения уравнения (53) находятся методом итераций некоторого начального распределения зародыша кристаллической фазы $f(t) = h(t)|_{t \in [0, 1/v]}$. Если отображение $\Phi: I \mapsto I$ переводит некоторый открытый ограниченный интервал I в себя, то все решения разностного уравнения (53) неограниченно продолжимы на интервал $t \in [0, +\infty)$ и ограничены. При этом упорядоченные структуры возникают, если и только если доля некоторого кристаллического начального зародыша (который может возникнуть флуктуационным образом) превышает некоторую критическую массу (размер зародыша превышает некоторый критический радиус).

Обозначим через $Fix \Phi = \{f\Phi(f) = f\}$ множество неподвижных точек отображения Ф. Обозначим через $P^+(\Phi) = \{f \in Fix \Phi : |\Phi'(f)| < 1\}$ множество притягивающих неподвижных точек, а через $P^{-}(\Phi) = \{ f \in Fix \Phi : |\Phi'(f)| > 1 \}$ – множество отталкивающих неподвижных точек. Тогда из [Беленький, 1989] вытекает, что для достаточно широкого множества начальных функций h(t) почти все решения уравнения (53) с отображением Φ , обладающим указанными выше свойствами, сходятся при $t \rightarrow +\infty$ к некоторой асимптотически $2^{N} l/v$ -периодической кусочно-постоянной функции с конечным, счетным или несчетным нигде не плотным множествами точек разрыва на периоде. Здесь *N* – наименьшее общее кратное периодов притягивающих циклов отображения Ф (см. [Беленький, 1989]). Решения уравнения (53), обладающие такими свойствами, называют соответственно решениями релаксационного, предтурбулентного и турбулентного типа. На рис. 1 показаны решения релаксационного типа, которые моделируют процесс возникновения зародышей кристаллической фазы в жидком расплаве.

В общем случае отображение $\Phi = \Phi(\mu,\kappa)$ зависит от параметров $\mu = -\frac{U_a}{k_B T}$ и $\kappa = -\frac{W_{cr}}{k_B T}$ для изотермической задачи и параметров $\mu_m = -\frac{U_a}{k_B T_m}$ и $\kappa_m = -\frac{W_{cr}}{k_B T_m}$ для неизотермической задачи. Например, при изменении параметра μ имеют место бифуркации решений, которые сопровождаются изменением периодов в соответствии с универсальным порядком Шарковского [Ананин и др., 2006] 1<2<4<...<5×2<3×2<...<5<3, который означает, что если отображение $\Phi(\mu)$ имеет цикл периода 3, то оно имеет циклы всех периодов. Напомним, что циклом периода *n* отображения Φ называется последовательность неподвижных точек, которые после *n*-итераций переходят в себя. При этом в аналитическом случае удвоение периодов происходит с универсальной скоростью $\delta = 4.669...$ и характеризуется универсальным отношением амплитуд возникающих колебаний $\alpha = 2.502...$ [Шарковский, 1964; Шарковский и др., 1986]. Это дает возможность говорить о каскадном процессе образования зародышей кристаллической фазы в жидком расплаве.

В самом деле, именно с помощью решений турбулентного типа, изображенных на рис. 1, можно дать наглядное представление такого явления, как каскадный процесс образования зародышей кристаллической фазы все уменьшающихся масштабов. Если проследить поведение решений f(t) на рис. 1, то легко заметить, что рост частоты колебаний решения f(t) сопровождается появлением «полочек» (интервалов медленных движений или медленной кристаллизации). С течением времени число вновь появившихся «полочек» растет, а их размеры убывают к нулю, что дает возможность говорить о моделировании «идеальных» наноструктур. Тогда на рис. 1 можно увидеть, как рождаются кристаллические структуры в жидком расплаве, причем все более мелких масштабов.

Число $k_m = G$, где $G = W_{cr} / k_B T$, называется числом Гиббса [Скрипов, 1972], оно определяет наиболее существенную информацию об устойчивости метастабильного расплава и частоте спонтанного зародышеобразования. Оно представляет собой отношение высоты активационного барьера при гомогенной флуктуации к средней энергии теплового движения на одну степень свободы. Тогда имеет место универсальное упорядочение по Фейгенбауму [Шарковский и др., 1986]: $\lim_{n \to \infty} \frac{G_{n+1} - G_n}{G_n - G_{n-1}} = \delta$ где $\delta = 4.669...$ – постоянная Фейгенбаума [Шарковский, 1964]. При таком выборе последовательности чисел Гиббса происходит последовательное удвоение числа колебаний на периоде с универсальной скоростью δ .

Напомним, что параметр G = G(T) зависит от температуры [Скрипов, 1972]. Отсюда вытекает, что, управляя параметром G на эксперименте (охлаждая расплав), мы можем (во всяком случае, теоретически) реализовать режим кристаллизации расплава с удвоением числа колебаний на периоде. При этом существует область значений параметра $G \subset \Pi_{pred}$ такая, что при всех G из этой области число колебаний параметра порядка увеличивается степенным или экспоненциальным образом со временем. Такие колебания параметра порядка называются, по терминологии [Шарковский и др., 1986], распределениями предтурбулентного типа.

Далее существует область значений параметра $G \subset \Pi_{urb}$ такая, что при всех G из этой области число колебаний параметра порядка увеличивается экспоненциальным образом. Такие распределения мы будем называть колебаниями турбулентного типа. Они моделируют каскадный процесс образования зародышей кристаллической фазы при охлаждении расплава.

Существует достаточно узкая область значений параметра G_{stoch} такая, что при всех G из этой области распределение параметра порядка является случайным процессом, для которо-

го можно найти распределения вероятностей, с которыми амплитуда параметра порядка в данной пространственно-временной точке принимает то или иное значение при специальном выборе граничных условий (см. [Шарковский и др., 1986], где построены соответствующие примеры). Это означает, что область значений параметра порядка представляет собой интервал для решений стохастического (случайного) типа, а сами распределения должны принадлежать точкам интервала на каждом шаге с некоторой вероятностью. Разумеется, случайное зародышеобразование наблюдается в эксперименте; более того, как показывают эксперименты для перегретых жидкостей в пузырьковых камерах Вильсона, такое зародышеобразование является типичным. Тем не менее экспериментальное подтверждение последних утверждений данной работы требует статистической обработки данных при экспериментальных измерениях плотности образующихся зародышей кристаллической фазы в жидком расплаве при быстром (непрерывном) охлаждении расплава.

Заключение

Рассмотрена модель системы уравнений Пенроуза-Файфа для концентрации параметра порядка с нелинейными динамическими граничными условиями. Доказано существование предельных (при больших временах) периодических решений типа ударных волн релаксационного, предтурбулентного и турбулентного типа. Поверхностный параметр порядка определяет механические и деформационные свойства образца в приложении к механике деформируемого твердого тела. Показано, что при охлаждении образца в окрестности критической температуры плавления возможны осциллирующие деформационные колебания параметра порядка. При этом характер, амплитуда и число колебаний изменяются при каждой фиксированной температуре на поверхности. Для классической граничной модели Пенроуза-Файфа в приложении к физике деформации твердого тела изложенные результаты являются новыми, в литературе отсутствуют аналоги для данной краевой задачи.

Список литературы

1. Александров Л.Н. **1989.** Кинетика кристаллизации и перекристаллизации полупроводниковых пленок. Новосибирск: Наука, 224 с.

2. Ананин С.И., Асташинский В.М., Емельяненко А.С., Костюкевич Е.А. и др. **2006.** Динамика плавления и кристаллизации монокристаллического кремния при воздействии компрессионных плазменных потоков. *Журнал технической физики*, 76(7): 34–40.

3. Асташинский В.М., Ананин С.Н., Аскерко В.В. и др. **2002.** Воздействие компрессионных потоков плазмы на углеродистую сталь и кремний. *Вакуумная техника и технология*, 12(2): 91–94.

4. Беленький В.З. 1989. Геометрико-вероятностные методы кристаллизации. М.: Наука, 88 с.

5. Вул Е.Б, Синай Я.Г., Ханин К.Н. **1984.** Универсальность Фейгенбаума и термодинамический формализм. *Успехи математических наук*, 39(3): 3–37.

6. Колмогоров А.Н. **1937.** К статистической теории кристаллизации металлов. Изв. АН СССР. Серия математическая, 1(3): 355–359.

7. Колмогоров А.Н. **1941.** Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса. Докл АН СССР, 30(4):299–303.

8. Скрипов В.П. 1972. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 312 с.

9. Скрипов В.П., Коверда В.П. **1984.** Спонтанная кристаллизация переохлажденных жидкостей. М.: Наука, 232 с.

10. Углов В.В., Анищик В.Н., Асташинский В.В., Асташинский В.М. и др. **2001.** Формирование субмикронных цилиндрических структур при воздействии на поверхность кремния компрессионным плазменным потоком. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 74(4): 234–236.

11. Шарковский А.М. **1964.** Сосуществование циклов непрерывного преобразования прямой в прямую. *Украинский математический журнал*, 26(1): 61–71.

12. Шарковский А.Н., Майстренко Ю.Л., Романенко Е.Ю. **1986.** *Разностные уравнения и их приложения*. Киев: Наукова думка, 280 с.

13. Эйдельман Е.Д. 1995. Возбуждение электрической неустойчивости нагреванием. Успехи физических наук, 165(11): 1279–1294.

14. Caginalp G., Xie W. **1993.** Phase-field and sharp-interface alloy models. *Physical Review E*, 48(3): 1897–1909. https://doi.org/10.1103/physreve.48.1897

15. Fife P.C., Penrose O. **1995.** Interfacial dynamics for thermodynamically consistent phase-field models with nonconserved order parameter. *Electronic J. of Differential Equations*, 16: 1–49. https://digital.library.txstate.edu/handle/10877/7579

16. Krasnyuk I.B., Taranets R.M., Chugunova M. **2018.** Dynamic boundary conditions in the interface modeling of binary alloys. *AIMS Mathematics*, 3(3): 409–425. https://doi.org/10.3934/Math.2018.3.409

17. Penrose O., Fife P.C. **1993.** On the relation between the standard phase-field model and a "thermodynamically consistent" phase-field model. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 69(1-2): 107–113. https://doi.org/10.1016/0167-2789(93)90183-2

References

1. Aleksandrov L.N. **1989.** *Kinetika kristallizatsii i perekristallizatsii poluprovodnikovykh plenok* [*Crystallization and recrystallization kinetics of semiconduct films*]. Novosibirsk: Nauka, 224 p. (In Russ.).

2. Ananin S.I., Astashinsky V.M., Emel'yanenko A.S., Kostyukevich E.A., Kuz'mitski A.M., Zhvavy S.P., Anishchik V.M., Uglov V.V., Pun'ko A.V. **2006.** Melting and crystallization dynamics of single-crystal silicon exposed to compression plasma flows. *Technical Physics*, 51(7): 853–859. https://doi.org/10.1134/s1063784206070061

3. Astashinskiy V.M., Ananin S.N., Askerko V.V. et al. **2002.** [Compressive plasma flows effect on carbon steel and silicon]. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya* [*Vacuum engineering and technology*], 12(2): 91–94. (In Russ.).

4. Belen'kiy V.Z. **1989.** Geometriko-veroyatnostnye metody kristallizatsii [Geometrical and probabilistic methods of crystallization]. Moscow: Nauka, 88 p. (In Russ.).

5. Vul E.B, Sinay Ya.G., Khanin K.N. **1984.** Universal'nost' Feygenbauma i termodinamicheskiy formalizm [Feigenbaum universality and thermodynamic formalism]. *Uspekhi matematicheskikh nauk*, 39(3): 3–37. (In Russ.).

6. Kolmogorov A.N. **1937.** K statisticheskoy teorii kristallizatsii metallov [On the statistical theory of metall crystallization]. *Izv. AN SSSR. Seriya matematicheskaya*, 1(3): 355–359. (In Russ.).

7. Kolmogorov A.N. **1941.** Lokal'naya struktura turbulentnosti v neszhimaemoy vyazkoy zhidkosti pri ochen' bol'shikh chislakh Reynol'dsa [Local structure of the turbulence in an incompressible viscous fluid at very high Reynolds numbers]. *Dokl AN SSSR*, 30(4): 299–303. (In Russ.).

8. Skripov V.P. 1972. Metastabil'naya zhidkost' [Metastable liquid]. Moscow: Nauka, 312 p. (In Russ.).

9. Skripov V.P., Koverda V.P. **1984.** Spontannaya kristallizatsiya pereokhlazhdennykh zhidkostey [The spontaneous crystallization of supercooled liquids]. Moscow: Nauka, 232 p. (In Russ.).

10. Uglov V.V., Anishchik V.M., Astashynski V.V., Astashinsky V.M., Ananin S.I., Askerko V.V., Kostyukevich E.A., Kuzmitsky A.M., Kvasov N.T., Danilyuk A.L. **2001.** Formation of submicron cylindrical structures at silicon surface exposed to a compression plasma flow. *J. of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters)*, 74(4): 213–215.

11. Sharkovskiy A.M. **1964.** Sosushchestvovanie tsiklov nepreryvnogo preobrazovaniya pryamoy v pryamuyu [Coexistence of the cycles of continuous map of the line into itself]. *Ukrainskiy matematicheskiy zhurnal*, 26(1): 61–71. (In Russ.).

12. Sharkovskiy A.N., Maystrenko Yu.L., Romanenko E.Yu. **1986.** *Raznostnye uravneniya i ikh prilozheniya* [*Difference equations and their applications*]. Kiev: Naukova dumka, 280 p. (In Russ.).

13. Eydel'man E.D. **1995.** Vozbuzhdenie elektricheskoy neustoychivosti nagrevaniem [Excitation of the electric instability by voltage]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 165(11): 1279–1294. (In Russ.).

14. Caginalp G., Xie W. **1993.** Phase-field and sharp-interface alloy models. *Physical Review E*, 48(3): 1897–1909. https://doi.org/10.1103/physreve.48.1897

15. Fife P.C., Penrose O. **1995.** Interfacial dynamics for thermodynamically consistent phase-field models with nonconserved order parameter. *Electronic J. of Differential Equations*, 16: 1–49. https://digital.library.txstate.edu/handle/10877/7579

16. Krasnyuk I.B., Taranets R.M., Chugunova M. **2018.** Dynamic boundary conditions in the interface modeling of binary alloys. *AIMS Mathematics*, 3(3): 409–425. https://doi.org/10.3934/Math.2018.3.409

17. Penrose O., Fife P.C. **1993.** On the relation between the standard phase-field model and a "thermodynamically consistent" phase-field model. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 69(1-2): 107–113. https://doi.org/10.1016/0167-2789(93)90183-2

Сведения об авторах

КРАСНЮК Игорь Борисович (https://orcid.org/0000-0001-7816-5743), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела теории электронных и кинетических свойств нелинейных систем, Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина Национальной академии наук Украины, Донецк, Украина, igorkrasnuyk@rambler.ru

ЗАБОЛОТИН Андрей Евгеньевич (https://orcid.org/0000-0001-5952-9978), кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, Южно-Сахалинск, Россия, a.zabolotin@imgg.ru

About the Authors

KRASNYUK Igor B. Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Department of theory of electronic and kinetic properties of the nonlinear systems, The Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O. Galkin of the National Academy of Sciences of Ukraine (NASU), Donetsk, Ukraine, igorkrasnuyk@rambler.ru

ZABOLOTIN Andrey E. Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Researcher of the Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, a.zabolotin@imgg.ru
Тематический указатель статей, опубликованных в журнале «Геосистемы переходных зон» в 2021 г. (том 5)

Автор(ы). Название	Год, номер: страницы
Геотектоника и геодинамика	
<i>Жигулев В.В., Жигулев А.В.</i> Геологическое развитие северной части Срединно-Курильского прогиба по данным сейсмофациального анализа https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.275-286	2021, 3: 275–286
Общая и региональная геология. Петрология. Вулканология	
Дегтерев А.В., Чибисова М.В., Жарков Р.В. Активность вулканов Чиринкотан и Пик Сарычева в 2021 г. (Курильские острова) https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.354-360	2021, 4: 354–360
Рассказов С.В., Рыбин А.В., Дегтерев А.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В. Плиоценовый адакитоподобный акцент андезитов и дацитов на Орловском вулканическом поле (о. Сахалин) https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.255-274	2021, 3: 255–274
Костров Ю.В., Дегтярев В.А., Маринин А.В., Хмарин Э.К., Каменев П.А. Изучение трещинных коллекторов при проведении геологоразведочных работ в северо-восточной части о. Сахалин https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.153-166	2021, 2: 153–166
<i>Дегтерев А.В., Чибисова М.В.</i> Активизация вулкана Пик Сарычева в 2020–2021 гг. (о. Матуа, Центральные Курильские острова) https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.167-171	2021, 2: 167–171
<i>Бондаренко В.И., Рашидов В.А.</i> Подводная газо-гидротермальная активность в пределах Курильской островной дуги https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.004-013	2021, 1: 4–13
Казаков А.И., Веселов О.В., Козлов Д.Н. Статистический анализ распределения продуктов фреатического извержения в кальдере вулкана Головнина (о. Кунашир, Курильские острова) https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.014-026	2021, 1: 14–26
Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых. Сейсмология, методы прогноза	
Сафонов Д.А., Фокина Т.А. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2020 году https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.308-319	2021, 4: 308–319
<i>Лексин В.К.</i> Палеоврезы и газовые зоны плиоцен-четвертичных отложений на площадке инженерно-гео- логических изысканий на шельфе острова Сахалин https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.320-327	2021, 4: 320–327
<i>Ребецкий Ю.Л.</i> К теории детерминированного прогноза землетрясений методом LUR <i>R</i> https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.192-208.208-222	2021, 3: 192–222
Валитов М.Г., Прошкина З.Н. Изменение амплитудных показателей в приливных вариациях силы тяжести в период подготовки близких землетрясений https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.223-228	2021, 3: 223–228
<i>Малышев А.И., Малышева Л.К.</i> Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.084-098.099-112	2021, 2: 84–112
<i>Прытков А.С., Василенко Н.Ф.</i> Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г. MW = 7.5 https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.113-120.121-127	2021, 2: 113–127
<i>Родкин М.В.</i> О форшоковом каскаде и удивительных прогнозах, в связи со статьей А.И. Малышева и Л.К. Малышевой «Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил» https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.128-132.133-137	2021, 2: 128–137
<i>Богомолов Л.М., Сычев В.Н.</i> Физические основы модели саморазвивающихся процессов и вопросы ее при- менения для прогнозов землетрясений в Дальневосточном регионе https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.138-145.145-152	2021, 2: 138–152
Закупин А.С., Богинская Н.В. Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на Сахалине: обобщение ретроспективных исследований за 1997–2019 гг. и новые подходы https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.027-045	2021, 1: 27–45
Дудченко И.П., Костылев Д.В., Гуляков С.А., Стовбун Н.С. Геофизический генератор импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.046-054	2021, 1: 46–54
<i>Ребецкий Ю.Л.</i> О некоторых аспектах статьи «О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии» https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.055-059	2021, 1: 55–59
Геоморфология и эволюционная география	
Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Копотева Т.А., Климин М.А., Лящевская М.С., Паничев А.М., Арсланов Х.А., Максимов Ф.Е., Петров А.Ю. Развитие Солонцовских озер как показатель динамики увлажне- ния в Центральном Сихотэ-Алине в позднем голоцене https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.287-304	2021, 3: 287–304

Геоинформатика	
<i>Булгаков Р.Ф.</i> 3D-моделирование эффекта гидроизостазиис близкой к реальной конфигурацией поверхности Мохо для Охотского моря https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.339-345	2021, 4: 339–345
<i>Елохина С.Н., Мызникова Т.С., Худяков А.А.</i> Состояние информационно-аналитической базы данных экзо- генных геологических процессов на территории Уральского федерального округа https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.346-353	2021, 4: 346–353
<i>Никонов В.С.</i> Алгоритм обработки площадей льда по данным дистанционного зондирования Земли (на примере данных MASIE-NH) https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.067-071	2021, 1: 67–71
Океанология	
Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С., Кириллов К.В. Особенности волнения в южной части Охотского моря – акватории маршрутов водного транспортак южным Курильским островам https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.328-338	2021, 4: 328–338
Шакиров Р.Б., Веникова А.Л., Соколова Н.Л., Обжиров А.И., Веселов О.В., Мальцева Е.В., Кузив Ф.В., Лек- син В.К. Особенности аномальных газогеохимических полей в Восточно-Дерюгинском грабене Охотского моря https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.229-239	2021, 3: 229–239
<i>Мишукова Г.И., Яцук А.В., Шакиров Р.Б.</i> Распределение потоков метана на границе вода–атмосфера в различных районах Мирового океана https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.240-247.247-254	2021, 3: 240–254
Шевченко Г.В., Частиков В.Н. О необычном характере распространения модифицированной амурской воды в заливе Анива (Сахалин) в ноябре 2001 г. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.172-178	2021, 2: 172–178
<i>Кораблев О.А.</i> О новом предикторе, влияющем на ледообразование в Охотском море https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.060-066	2021, 1: 60–66
Геоэкология	
<i>Никитенко О.А., Ершов В.В.</i> Гидрогеохимические критерии поиска и разработки углеводородных место- рождений: обзор, анализ и перспективы использования на острове Сахалин https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.361-377	2021, 4: 361–377
<i>Казмирук В.Д.</i> Механизмы перехвата пластиковых микрочастиц буферными зонами из макрофитов https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.378-388	2021, 4: 378–388
Пономарева А.Л., Полоник Н.С., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б., Григоров Р.А., Шмале О., Мау С. Взаимо- связь распределения метана и психро-, мезо- и термофильных углеводородокисляющих микроорганизмов в донных отложениях в Карском море https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.389-393.394-398.	2021, 4: 389–398
<i>Лупаков С.Ю.</i> Оценка эластичности стока рек восточной части бассейна Амура https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.179-188	2021, 2: 179–188
Механика деформируемого твердого тела	
Краснюк И.Б., Заболотин А.Е. Детерминированные и стохастические колебания фрактального типа при охлаждении расплава https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.439-447	2021, 4: 439–447
Экология	
<i>Мотылькова И.В.</i> Видовой состав и эколого-географическая характеристика фитоперифитона бассейна р. Лютога (о. Сахалин) https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.399-427	2021, 4: 399–427
<i>Каганов В.В., Кордюков А.В., Ежкин А.К.</i> Особенности распространения эпифитных лишайников на коре тополя Максимовича в городе Южно-Сахалинск и его окрестностях https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.428-438	2021, 4: 428–438
Хроника научной жизни	
Третья Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Нефтегазовый ком- плекс: проблемы и решения»	2021, 1: 72

Авторский указатель публикаций в журнале «Геосистемы переходных зон» в 2021 г. (том 5)

Автор(ы). Название	Номер: страницы
Арсланов Х.А. См. Разжигаева Н.Г.	3
Богинская Н.В. См. Закупин А.С.	1
Богомолов Л.М., Сычев В.Н. Физические основы модели саморазвивающихся процессов и вопросы ее при- менения для прогнозов землетрясений в Дальневосточном регионе	2: 138–152

Бондаренко В.И., Рашидов В.А. Подводная газо-гидротермальная активность в пределах Курильской островной дуги	1: 4–13
Борисов А.С. См. Ковалев Д.П.	4
Булгаков Р.Ф. 3Д-моделирование эффекта гидроизостазии с близкой к реальной конфигурацией поверхности Мохо для Охотского моря	4: 339–345
Валитов М.Г., Прошкина З.Н. Изменение амплитудных показателей в приливных вариациях силы тяжести в период подготовки близких землетрясений	3: 223–228
Василенко Н.Ф. См. Прытков А.С.	2
Веникова А.Л. См. Шакиров Р.Б.	3
Веселов О.В. См. Казаков А.И. Он же. См. Шакиров Р.Б.	1.3
Ганзей Л.А. См. Разжигаева Н.Г.	3
Гребенникова Т.А. См. Разжигаева Н.Г.	3
Григоров Р.А. См. Пономарева А.Л.	4
Гуляков С.А. См. Дудченко И.П.	1
Дегтерев А.В. См. Рассказов С.В.	3
Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Активизация вулкана Пик Сарычева в 2020–2021 гг. (о. Матуа, Центральные Курильские острова)	2: 167–171
Дегтерев А.В., Чибисова М.В., Жарков Р.В. Активность вулканов Чиринкотан и Пик Сарычева в 2021 г. (Курильские острова)	4: 354–360
Дегтярев В.А. См. Костров Ю.В.	2
Дудченко И.П., Костылев Д.В., Гуляков С.А., Стовбун Н.С. Геофизический генератор импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр	1: 46–54
Елохина С.Н., Мызникова Т.С., Худяков А.А. Состояние информационно-аналитической базы данных экзо- генных геологических процессов на территории Уральского федерального округа	4: 346–353
Ершов В.В. См. Никитенко О.А.	4
<i>Ёжкин А.К.</i> См. Каганов В.В.	4
Жарков Р.В. См. Дегтерев А.В Активность	4
Жигулев А.В. См. Жигулев В.В.	3
Жигулев В.В., Жигулев А.В. Геологическое развитие северной части Срединно-Курильского прогиба по данным сейсмофациального анализа	3: 275–286
Заболотин А.Е. См. Краснюк И.Б.	4
Закупин А.С., Богинская Н.В. Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на Сахалине: обобщение ретроспективных исследований за 1997–2019 гг. и новые подходы	1: 27–45
Каганов В.В., Кордюков А.В., Ежкин А.К. Особенности распространения эпифитных лишайников на коре тополя Максимовича в городе Южно-Сахалинск и его окрестностях	4: 428–438
Казаков А.И., Веселов О.В., Козлов Д.Н. Статистический анализ распределения продуктов фреатического извержения в кальдере вулкана Головнина (о. Кунашир, Курильские острова)	1: 14–26
Казмирук В.Д. Механизмы перехвата пластиковых микрочастиц буферными зонами из макрофитов	4: 378–388
Каменев П.А. См. Костров Ю.В.	2
Кириллов К.В. См. Ковалев Д.П.	4
Климин М.А. См. Разжигаева Н.Г.	3
Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С., Кириллов К.В. Особенности волнения в южной части Охотского моря – акватории маршрутов водного транспорта к южным Курильским островам	4: 328–338
Ковалев П.Д. См. Ковалев Д.П.	4
Козлов Д.Н. См. Казаков А.И.	1
Копотева Т.А. См. Разжигаева Н.Г.	3
Кораблев О.А. О новом предикторе, влияющем на ледообразование в Охотском море	1: 60–66
Кордюков А.В. См. Каганов В.В.	4
Костров Ю.В., Дегтярев В.А., Маринин А.В., Хмарин Э.К., Каменев П.А. Изучение трещинных коллекторов при проведении геологоразведочных работ в северо-восточной части о. Сахалин	2: 153–166
Костылев Д.В. См. Дудченко И.П.	1

Кузив Ф.В. См. Шакиров Р.Б. 3 Лексин В.К. Палеоврезы и газовые зоны плиоцен-четвертичных отложений на площадке инженерно-геологических изысканий на шельфе острова Сахалин 4: 320–327 Лексин В.К. См. Шакиров Р.Б. 3 Лупаков С.Ю. Оценка эластичности стока рек восточной части бассейна Амура 2: 179–188 Лящевская М.С. См. Разжигаева Н.Г. 3
Лексин В.К. Палеоврезы и газовые зоны плиоцен-четвертичных отложений на площадке инженерно-геологических изысканий на шельфе острова Сахалин 4: 320–327 Лексин В.К. См. Шакиров Р.Б. 3 Лупаков С.Ю. Оценка эластичности стока рек восточной части бассейна Амура 2: 179–188 Лящевская М.С. См. Разжигаева Н.Г. 3
Лексин В.К. См. Шакиров Р.Б. 3 Лупаков С.Ю. Оценка эластичности стока рек восточной части бассейна Амура 2: 179–188 Лящевская М.С. См. Разжигаева Н.Г. 3
Лупаков С.Ю. Оценка эластичности стока рек восточной части бассейна Амура 2: 179–188 Лящевская М.С. См. Разжигаева Н.Г. 3
Лящевская М.С. См. Разжигаева Н.Г. 3
<i>Максимов</i> Φ . Е. См. Разжигаева Н.Г. 3
Малышев А.И., Малышева Л.К. Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил
Малышева Л.К. См. Малышев А.И. 2
Мальцева Е.В. См. Шакиров Р.Б. 3
<i>Маринин А.В.</i> См. Костров Ю.В. 2
Мау С. См. Пономарева А.Л. 4
Мишукова Г.И., Яцук А.В., Шакиров Р.Б. Распределение потоков метана на границе вода–атмосфера в раз- личных районах Мирового океана 3: 240–254
Мотылькова И.В. Видовой состав и эколого-географическая характеристика фитоперифитона бассейна р. Лютога (о. Сахалин) 4: 399–427
Мызникова Т.С. См. Елохина С.Н. 4
Никитенко О.А., Ершов В.В. Гидрогеохимические критерии поиска и разработки углеводородных место- рождений: обзор, анализ и перспективы использования на острове Сахалин 4: 361–377
Никонов В.С. Алгоритм обработки площадей льда по данным дистанционного зондирования Земли (на примере данных MASIE-NH) 1: 67–71
<i>Обжиров А.И.</i> См. Пономарева А.Л. <i>Он же.</i> См. Шакиров Р.Б. 4, 3
Паничев А.М. См. Разжигаева Н.Г. 3
Петров А.Ю. См. Разжигаева Н.Г. 3
Полоник Н.С. См. Пономарева А.Л. 4
Пономарева А.Л., Полоник Н.С., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б., Григоров Р.А., Шмале О., Мау С. Взаимо- связь распределения метана и психро-, мезо и термофильных углеводородокисляющих микроорганизмов в донных отложениях в Карском море
Прошкина З.Н. См. Валитов М.Г. 3
Прытков А.С., Василенко Н.Ф. Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г. Мw = 7.5 2: 113–127
Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Копотева Т.А., Климин М.А., Лящевская М.С., Паничев А.М., Арсланов Х.А., Максимов Ф.Е., Петров А.Ю. Развитие Солонцовских озер как показатель динамики увлажнения в Центральном Сихотэ-Алине в позднем голоцене 3: 287–304
Рассказов С.В., Рыбин А.В., Дегтерев А.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В. Плиоценовый адакитоподобный акцент андезитов и дацитов на Орловском вулканическом поле (о. Сахалин) 3: 255–274
Рашидов В.А. См. Бондаренко В.И. 1
Ребецкий Ю.Л. К теории детерминированного прогноза землетрясений методом LURR 3: 192–222
Ребецкий Ю.Л. О некоторых аспектах статьи «О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии»
Родкин М.В. О форшоковом каскаде и удивительных прогнозах, в связи со статьей А.И. Малышева и Л.К. Малышевой «Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина 2: 128–137 и Южных Курил»
Рыбин А.В. См. Рассказов С.В.
Саранина Е.В. См. Рассказов С.В.
Сафонов Д.А., Фокина Т.А. Сейсмичность юга Лальнего Востока России в 2020 голу 4· 308–319
Соколова Н.Л.См. Шакиров РБ.
Стовбун Н.С. См. Лулченко И.П. 1
Сычев В.Н. См. Богомолов Л.М. 2
<i>Фокина Т.А.</i> См. Сафонов Д.А. 4

Хмарин Э.К. См. Костров Ю.В.	2
Худяков А.А. См. Елохина С.Н.	4
Частиков В.Н. См. Шевченко Г.В.	2
Чибисова М.В. См. Дегтерев А.В Активизация Она же. См. Дегтерев А.В Активность	2, 4
Чувашова И.С. См. Рассказов С.В.	3
Шакиров Р.Б. См. Мишукова Г.И. Он же. См. Пономарева А.Л.	3, 4
Шакиров Р.Б., Веникова А.Л., Соколова Н.Л., Обжиров А.И., Веселов О.В., Мальцева Е.В., Кузив Ф.В., Лексин В.К. Особенности аномальных газогеохимических полей в Восточно-Дерюгинском грабене Охотского моря	3: 229–239
Шевченко Г.В., Частиков В.Н. О необычном характере распространения модифицированной амурской воды в заливе Анива (Сахалин) в ноябре 2001 г.	2: 172–178
Шмале О. См. Пономарева А.Л.	4
Ясныгина Т.А. См. Рассказов С.В.	3
Яцук А.В. См. Мишукова Г.И.	3

Topical index of articles published in the journal "Geosystems of Transition Zones" in 2021 (volume 5)

Author(s). Title	Year, Issue: Pages
Geotectonics and geodynamics	
<i>Zhigulev V.V., Zhigulev A.V.</i> Geological evolution of the northern Mid Kuril trough based on seismic facies analysis https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.275-286	2021, 3: 275–286
General and regional geology. Volcanology, Petrology	
<i>Degterev A.V., Chibisova M.V., Zharkov R.V.</i> Activity of Chirinkotan and Sarychev Peak volcanoes in 2021 (Kuril Islands) https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.354-360	2021, 4: 354–360
<i>Rasskazov S.V., Rybin A.V., Degterev A.V., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A., Saranina E.V.</i> Pliocene adakite-like accent of andesites and dacites from the Orlov volcanic field (Sakhalin Island) https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.255-274	2021, 3: 255–274
Kostrov Yu.V., Degtyarev V.A., Marinin A.V., Khmarin E.K., Kamenev P.A. Study of fractured reservoirs during geological exploration in the north-eastern part of the Sakhalin Island https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.153-166	2021, 2: 153–166
Degterev A.V., Chibisova M.V. Activation of the Sarychev Peak volcano in 2020–2021 (Matua Isl., the Central Kuril Islands) https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.167-171	2021, 2: 167–171
<i>Bondarenko V.I., Rashidov V.A.</i> Underwater gas-hydrothermal activity within the Kuril island arc https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.004-013	2021, 1: 4–13
<i>Kazakov A.I., Veselov O.V., Kozlov D.N.</i> Statistical analysis of the distribution of phreatic eruption products in the caldera of the Golovnin volcano (Kunashir Island, Kuril Islands) https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.014-026	2021, 1: 14–26
Geophysics. Seismology	
Safonov D.A., Fokina T.A. Seismicity of the South Far East of Russia in 2020 https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.308-319	2021, 4: 308–319
<i>Leksin V.K.</i> . Paleo-incisions and gas zones of Pliocene-Quaternary sediments at the site of engineering and geological surveys on the shelf of Sakhalin Island https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.320-327	2021, 4: 320–327
<i>Rebetsky Yu.L.</i> Concerning the theory of LURR based deterministic earthquake prediction https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.192-208.208-222	2021, 3: 192–222
<i>Valitov M.G.</i> , Proshkina <i>Z.N.</i> Change in the amplitude indicators in tidal variations of gravity during the preparation of nearby earthquakes https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.223-228	2021, 3: 223–228
<i>Malyshev A.I., Malysheva L.K.</i> Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.084-098.099-112	2021, 2: 84–112
Prytkov A.S., Vasilenko N.F. The March 25, 2020 M _w 7.5 Paramushir earthquake https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.113-120.121-127	2021, 2: 113–127
<i>Rodkin M.V.</i> On the foreshock cascade and extraordinary predictions, in relevance to the article by A.I. Malysheva and L.K. Malysheva "Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region" https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.128-132.133-137	2021, 2: 128–137

<i>Bogomolov L.M., Sychev V.N.</i> Fundamental for self-developing processes model and problems of its application to earthquakes prediction in the Far East region https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.138-145.145-152	2021, 2: 138–152
<i>Zakupin A.S., Boginskaya N.V.</i> Mid-term earthquake prediction using the LURR method on Sakhalin Island: A summary of retrospective studies for 1997–2019 and new approaches https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.027-045	2021, 1: 27–45
<i>Dudchenko I.P., Kostylev D.V., Gulyakov</i> S.A., <i>Stovbun N.S.</i> A geophysical pulse voltage generator for seismic and electric exploration of the subsurface https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.046-054	2021, 1: 46–54
<i>Rebetsky Yu.L.</i> On some aspects of the article «On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy». https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.055-059	2021, 1: 55–59
Geomorphology and evolution geography	
Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Kopoteva T.A., Klimin M.A., Lyaschevskaya M.S., Pan- ichev A.M., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E., Petrov A.Yu. Development of Solontsovskie Lakes as indicator of humidity within Central Sikhote-Alin in the Late Holocene https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.287-304	2021, 3: 287–304
Geoinformatics	
<i>Bulgakov R.F.</i> 3D modeling of the hydroisostasy effect with a configuration of Moho surface of the Sea of Okhotsk close to real https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.339-345	2021, 4: 339–345
<i>Elokhina S.N., Myznikova T.S., Khudyakov A.A.</i> State of the information and analytic database of exogenous geological processes on the territory of the Ural Federal District https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.346-353	2021, 4: 346–353
<i>Nikonov V.S.</i> An algorithm for processing ice areas by Earth remote sensing data (by the example of MASIE-NH data) https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.067-071	2021, 1: 67–71
Oceanology	
<i>Kovalev D.P., Kovalev P.D., Borisov A.S., Kirillov K.V.</i> Wave characteristics in the southern part of the Sea of Okhotsk – the area of water transport routes to the southern Kuril Island https://doi.org/10.30730/ettrz.2021.5.4.328-338	2021, 4: 328–338
Shakirov R B. Venikova A I. Sokolova N I. Obshirov A I. Veselov O V. Malteeva F. V. Kuziv F.V. Peculiarities	
of anomalous gas-geochemical fields in the East Deryugin graben of the Sea of Okhotsk https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.229-239	2021, 3: 229–239
<i>Mishukova G.I., Yatsuk A.V., Shakirov R.B.</i> Distribution of methane fluxes on the water–atmosphere interface in different regions of the World Ocean https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.3.240-247.247-254	2021, 3: 240–254
Shevchenko G.V., Chastikov V.N. On the unusual distribution of modified Amur River water in the Aniva Bay (Sakhalin) in November 2001 https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.172-178	2021, 1: 172–178
<i>Korablev O.A.</i> On a new predictor affecting ice formation in the Sea of Okhotsk https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.060-066	2021, 1: 60–66
Geoecology	
<i>Nikitenko O.A., Ershov V.V.</i> Hydrogeochemical indicators for the exploration and development of hydrocarbon fields: review, analysis and prospects for use on Sakhalin Island https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.361-377	2021, 4: 361–377
<i>Kazmiruk V.D.</i> Mechanisms of plastic microparticles retention by buffer zones with macrophytes https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.378-388	2021, 4: 378–388
<i>Ponomareva A.L., Polonik N.S., Obzhirov A.I., Shakirov R.B., Grigorov R.A., Schmale O., Mau S.</i> . Interrelation of methane distribution with psychro-, meso- and thermophilic hydrocarbon-oxidizing microorganisms in the bottom sediments of the Kara Sea https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.389-393.394-398	2021, 4: 389–398
<i>Lupakov S.Yu.</i> . Estimation of the runoff elasticity of the rivers in the eastern part of the Amur River basin https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.179-188	2021, 2: 179–188
Mechanics of deformable solids	
<i>Krasnyuk I.B., Zabolotin A.E.</i> Deterministic and stochastic oscillations of fractal type during cooling of the melt https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.439-447	2021, 4: 439–447
Ecology	
<i>Motylkova I.V.</i> Taxonomic structure and ecology-geographical characteristic of phytoperiphyton in the Lyutoga River (Sakhalin Island) https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.399-427	2021, 4: 399–427
<i>Kaganov V.V., Kordyukov A.V., Ezhkin A.K.</i> Distribution features of epiphytic lichens on <i>Populus maximowiczii</i> in Yuzhno-Sakhalinsk city and its suburbs. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.428-438	2021, 4: 428–438
Current Events	
Third National scientific and practical conference with international participation: «Oil and gas complex: prob- lems and solutions»	2021, 1: 72

Книги Books

Ковалев Д.П., Ковалев П.Д. Хаотические колебания, бифуркация и синхронизация в морских динамических системах / отв. ред.: канд. физ.-мат. наук В.И. Иволгин; рец.: д-р геогр. наук Т.В. Белоненко. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2021. – 114 с., библиогр. 187 назв. ISBN 978-5-6044483-2-8

https://dx.doi.org/10.30730/978-5-6044483-2-8.2021-2

В монографии рассматриваются результаты изучения поведения морских динамических систем, в том числе с хаотическими колебаниями. Необходимость таких исследований стимулировалась прежде всего практическими целями, в первую очередь для учета в системах швартовки судов тех последствий, к которым может привести возникновение сложной динамики. Разработанная к настоящему времени теория нелинейных динамических систем показывает, что большая волна может образоваться как комбинация меньших волн.

Исследования проведены на основе данных натурных наблюдений в портовых бухтах и прибрежной зоне о. Сахалин с использованием математических моделей динамических систем с применением уравнений Дуффинга и Ван дер Поля. Это обеспечивает всестороннее понимание поведения динамических систем с учетом воздействия на них приходящих морских волн и позволяет выработать рекомендации по предотвращению катастрофических ситуаций.

Показано, что при сильном волнении в бухтах, в том числе совместно с приливной волной, режим волнения может переходить к хаотическому, при котором возможно образование волн большой амплитуды. Также, при качке на приходящих волнах пришвартованного судна, возможно возникновение режима «ударного генератора», при котором судно будет ударяться о демпферы с большой силой.

Рассмотрено поведение прибрежной динамической системы для покрытого льдом моря. Установлено, что при определенных условиях возможна синхронизация периодов колебаний морских льдин с периодом приходящих волн. Такой процесс может привести к росту амплитуды колебаний льда и, как следствие, к его разрушению, что представляет опасность и может служить основанием для подачи сигнала тревоги.

Для специалистов в области динамики океана и береговой инженерии, студентов и аспирантов по специальностям «океанология» и «физика атмосферы и гидросферы».

Для контактов: Ковалев Дмитрий Петрович, e-mail: d.kovalev@imgg.ru

Kovalev D.P., Kovalev P.D. Chaotic oscillations, bifurcation and synchronization in marine dynamical systems / Ed. V.I. Ivolgin, Cand. Sci. (Phys. and Math.); Rev. T.V. Belonenko, D-r of Geography. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, 2021. – 114 p., bibliography 187.

ISBN 978-5-6044483-2-8

https://dx.doi.org/10.30730/978-5-6044483-2-8.2021-2

The paper discusses the results of studying the behavior of marine dynamical systems, including those with chaotic oscillations. and the need for such studies was primarily stimulated by practical goals, first of all, to take into account the consequences in the ship mooring systems, that the emergence of complex dynamics can lead to. The theory of nonlinear dynamic systems developed to date shows that a large wave can be formed as a combination of smaller waves.

The described studies were carried out using the data from field observations in port bays and the coastal zone of Sakhalin Island and mathematical models of dynamical systems using the Duffing and Van der Pol equations. This provides a comprehensive understanding of the behavior of dynamic systems, taking into account the impact of the incoming sea waves on them and allows to develop the recommendations for the prevention of catastrophic situations.

It is shown that during the strong wind waves in the bays, also combined with tidal waves, the wave regime can change to chaotic, in which the formation of waves of large amplitude is possible. Also, when pitching of a moored vessel on the incoming waves, the "impact generator" mode may arise, when the vessel will hit the dampers with great force.

The behavior of the coastal dynamic system for an ice-covered sea is considered. It is shown that, under certain conditions, synchronization of the periods of sea ice floes oscillations with the period of incoming waves is possible. Such a process can lead to an increase in the amplitude of ice floe oscillations and, as a consequence, to its destruction, which is dangerous and can be used to signal an alarm.

For specialists in the field of ocean dynamics and coastal engineering, undergraduate and graduate students in the field of oceanology and physics of the atmosphere and hydrosphere.

Contact: Dmitry Kovalev, Doctor of Physics and Mathematics (Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk), e-mail: d.kovalev@imgg.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-73243 от 13.07.2018 г.).

Переводчик Качесова Галина Сергеевна Редактор к.ф.н. Низяева Галина Филипповна Дизайн Леоненкова Александра Викторовна Компьютерная еерстка Филимонкина Анна Александровна Корректор Качесова Галина Сергеевна Типография: 693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 15. http://www.imgg.ru Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 16,1. Тираж 150 экз. Заказ 7966. Свободная цена. Подписано в печать 24.12.2021. Подписной индекс в Интернет-каталоге «Пресса России» – 80882 По вопросам распространения обращаться также Е-mail: gtrz-journal@mail.ru Translator Galina S. Kachesova Editor Galina Ph. Nizyaeva, Cand. Sci. (Phylology) Design Alexandra V. Leonenkova Desktop publishing Anna A. Filimonkina Proofreader Galina S. Kachesova Publisher: 1B, Nauki Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022. http://www.imgg.ru Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 16,1. Number of copies 150. Order no. 7966. Free price. Date of publishing 24.12.2021. Subscription index in United web-catalogue «Press of Russia» – 80882 The Editorial Office can also be contacted by: E-mail: gtrz-journal@mail.ru



ХАОТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ.

В МОРСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ

БИФУРКАЦИЯ

СИСТЕМАХ

И СИНХРОНИЗАЦИЯ



Оформить подписку на 2022 год на печатную версию журнала можно на сайте Объединенного каталога «Пресса России» (www.pressa-rf.ru) в интернет-каталоге и интернет-магазине «Пресса по подписке» (https://www.akc.ru). Интернет-каталог доступен также в Казахстане, Китае, Беларуси, Украине, Киргизии, Азербайджане, Армении.

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» 80882 Активные ссылки на подписку: https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/t80882/ https://www.akc.ru/itm/geosistemy_i-perehodny_ih-zon/