

Научный журнал

Учредитель и издатель:

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения
Российской академии наук

Издаётся с января 2017 г.

Периодичность издания 4 раза в год

Scientific journal

Founder and Publisher:

Institute of Marine Geology and Geophysics
of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences

Published since January 2017

Periodicity: Quarterly

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.

The main objective of the journal is informing of scientific community, Russian and foreign, about the results of researches in geosystems of the Earth's transition zones and related problems of geophysics, geology, geodynamics, seismology, geoecology and other sciences.

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: :

- 1.6.1. Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика (*геолого-минералогические*)
- 1.6.3. Петрология, вулканология (*геолого-минералогические*)
- 1.6.9. Геофизика (*геолого-минералогические; физико-математические*)
- 1.6.14. Геоморфология и палеогеография (*географические*)
- 1.6.17. Океанология (*географические; геолого-минералогические; физико-математические*)
- 1.6.20. Геоинформатика, картография (*физико-математические*)
- 1.6.21. Геоэкология (*географические; геолого-минералогические*)
- 1.5.15. Экология (*биологические*)
- 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела (*технические; физико-математические*)
- отнесен в Перечне ВАК к журналам II квартеля (K2).

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 scientific results of dissertations for the Candidate of Sciences and Doctor of Sciences degrees in the following scientific specialties and corresponding branches of science should be published:
- 1.6.1. General and regional geology. Geotectonics and geodynamics (*Geology and Mineralogy*)
 - 1.6.3. Petrology and volcanology (*Geology and Mineralogy*)
 - 1.6.9. Geophysics (*Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics*)
 - 1.6.14. Geomorphology and Paleogeography (*Geography*)
 - 1.6.17. Oceanology (*Geography; Geology and Mineralogy; Physics and Mathematics*)
 - 1.6.20. Geoinformatics and cartography (*Physics and Mathematics*)
 - 1.6.21. Geoecology (*Geography; Geology and Mineralogy*)
 - 1.5.15. Ecology (*Biology*)
 - 1.1.8. Mechanics of deformable solids (*Physics and Mathematics; Engineering*)
 - it is assigned to the K2 quartile in the VAK list.

Адрес учредителя и издателя

ИМГиГ ДВО РАН
ул. Науки, 16, Южно-Сахалинск, 693022
Тел./факс: (4242) 791517
E-mail: gtrz-journal@mail.ru
Сайт: <http://journal.imgg.ru>

Postal address

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

© ИМГиГ ДВО РАН, 2023

Редакционная коллегия*Главный редактор*

Завьялов Петр Олегович, член-корреспондент РАН, д-р геогр. наук, заместитель директора, руководитель лаборатории взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Заместитель главного редактора

Богомолов Леонид Михайлович, д-р физ.-мат. наук, директор, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

Ответственный секретарь

Прытков Александр Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

- **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
- **Закупин Александр Сергеевич**, канд. физ.-мат. наук, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск – *зам. главного 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
- **Марапупец Юрий Валентинович**, д-р физ.-мат. наук, доцент, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Паратунка
- **Огородов Станислав Анатольевич**, профессор РАН, д-р геогр. наук, чл.-корр. РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
- **Плехов Олег Анатольевич**, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
- **Разжигаяева Надежда Глебовна**, д-р геогр. наук, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток
- **Ребetsкий 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
- **Сасорова Елена Васильевна**, д-р физ.-мат. наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Editorial Board*Editor-in-Chief*

Peter O. Zav'yalov, Corr. Member of the RAS, Dr. Sci. (Geography), Deputy Director, Head of the Laboratory of land-ocean interactions and the anthropogenic impact, P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia

Deputy Editor-in-Chief

Leonid M. Bogomolov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Director, Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Executive Secretary

Alexander S. Prytkov, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk

- **Vitaly V. Adushkin**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Geosphere Dynamics of RAS; Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow
- **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
- **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.), Professor, Institute of Geosphere Dynamics of RAS, Moscow
- **Andrei A. Kurkin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny 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.), Professor, 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.), Associate Professor, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation of the FEB RAS, Kamchatka Region
- **Stanislav A. Ogorodov**, Professor of RAS, Dr. Sci. (Geogr.), Corr. Member of RAES, Lomonosov Moscow State University, Moscow
- **Oleg A. Plekhov**, Corr. Member of RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of RAS, Perm'
- **Nadezhda G. Razjigaeva**, Dr. Sci. (Geogr.), Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok
- **Yuri L. Rebetskiy**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow
- **Mikhail V. Rodkin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of RAS, Moscow
- **Anatoly K. Rybin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Research Station of RAS in Bishkek City, Bishkek, Kyrgyzstan
- **Elena V. Sasorova**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow

Редакционная коллегия

- **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, Саппоро, Япония
- **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, чл.-корр. РАЕН, Заслуженный деятель науки РФ, 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**, профессор исключительного класса, Университет Ниццы София-Антиполис, Ницца, Франция
- **Ярмолук Владимир Викторович**, академик РАН, д-р геол.-минер. наук, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

Editorial Board

- **Irina V. Sergeeva**, Dr. Sci. (Biology), Professor, Saratov State Vavilov Agrarian University, Saratov
- **Hiroaki Takahashi**, Professor, Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, Sapporo, Japan
- **Yuliya I. Troitskaya**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Institute of Applied Physics of RAS, Nizhniy Novgorod; Lobachevsky University, Nizhniy Novgorod
- **Nadezhda K. Khristoforova**, Dr. Sci. (Biology), Professor, Corr. Member of RAES, Far Eastern Federal University, Vladivostok
- **Renat B. Shakirov**, Dr. Sci. (Geol. and Miner.), Associate Professor, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the FEB RAS, Vladivostok
- **Georgiy 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, Nice, France
- **Vladimir V. Yarmolyuk**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Geol. and Miner.), Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of RAS, Moscow

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. (Регистрационный номер ПИ № ФС 77-73243 от 13.07.2018 г.). Территория распространения – Российская Федерация, зарубежные страны.

Переводчик Качесова Галина Сергеевна

Редактор к.ф.н. **Низяева Галина Филипповна**
Компьютерная верстка **Филимонкина Анна Александровна**
Корректор **Качесова Галина Сергеевна**
Дизайн **Леоненкова Александра Викторовна**

Адрес редакции журнала и типографии:
 693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.
 gtrz-journal@mail.ru

Формат 60 × 84 /8. Усл. печ. л. 13.2.
 Тираж 150 экз. Заказ 8023. Свободная цена.
 Дата выхода в свет 28.09.2023.

Подписной индекс в Объединенном интернет-каталоге «Пресса России» (www.pressa-rr.ru) – 80882.
 По вопросам распространения обращаться также в редакцию.

Translator Galina S. Kachesova

Editor **Galina Ph. Nizyaeva**, Cand. Sci. (Phylogeny)
Desktop publishing **Anna A. Filimonkina**
Proofreader **Galina S. Kachesova**
Design **Alexandra V. Leonenkova**

Postal address of the Editorial Office and printing house:
 1B, Nauki Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022.
 gtrz-journal@mail.ru

Sheet size 60 × 84 /8. Conv. print. sheets 13.2.
 Number of copies 150. Order no. 8023. Free price.
 Date of publishing 28.09.2023.

Subscription index in the United web-catalogue "Press of Russia" (www.pressa-rr.ru) – 80882.
 Please also contact the Editorial Office for distribution.

СОДЕРЖАНИЕ

Геофизика. Сейсмология

Н.А. Сычева. Исследование сейсмотектонических деформаций земной коры Алтае-Саянской горной области. Часть I ... 223

Общая и региональная геология

М.Ф. Крутенко, В.И. Исаев, Г. Лобова. «Палеозойская» нефть Урманского месторождения (юго-восток Западной Сибири) ... 243

Общая и региональная геология. Океанология

Р.Б. Шакиров, Е.В. Мальцева, А.Л. Веникова, Н.Л. Соколова, А. И. Гресов. Комплексные геолого-геофизические исследования по обоснованию внешней границы континентального шельфа России в Охотском и Восточно-Сибирском морях (2006–2009 гг.): обзор ... 264

Океанология. Геоинформатика и картография

Г.В. Шевченко, Д.М. Ложкин. Сезонные и межгодовые вариации температуры поверхности моря в Татарском проливе по спутниковым данным ... 276

Т.А. Воронина, В.В. Воронин. [Метод выбора данных для восстановления формы источника цунами] ... 292

Механика деформируемого твердого тела

П.Г. Великанов, Ю.П. Артюхин. Исследование по динамике многоэтажных зданий ... 304

Геоэкология. Геоинформатика, картография

НАУЧНАЯ СМЕНА

М.Н. Маслова. Количественный анализ эколого-хозяйственного баланса и структуры использования земель бассейна р. Туманная ... 316

CONTENT

Geophysics. Seismology

N.A. Sycheva. Study of seismotectonic deformations of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region. Part I 223

General and regional geology

M.F. Krutenko, V.I. Isaev, G. Lobova. The Paleozoic oil in the Urman field (the southeast of Western Siberia) 243

General and regional geology. Oceanology

R.B. Shakirov, E.V. Maltseva, A.L. Venikova, N.L. Sokolova, A.I. Gresov. Complex geological and geophysical studies on substantiation of the outer limits of the Russian continental shelf in the Sea of Okhotsk and East Siberian Sea (2006–2009): Review (in Engl., <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2023-3-3.pdf>) 264

Oceanology. Geoinformatics and cartography

G.V. Shevchenko, D.M. Lozhkin. Seasonal and interannual variations in sea surface temperature in the Tatar Strait according to satellite data (in Engl., <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2023-3-4.pdf>) ... 276

T.A. Voronina, V.V. Voronin. Data selection method for restoring a tsunami source form (in English) 292

Mechanics of deformable solids

P.G. Velikanov, Y.P. Artyukhin. Research on the dynamics of multi-storey buildings 304

Geocology. Geoinformatics and cartography

NEW SCIENTIFIC GENERATION

M.N. Maslova. Quantitative analysis of the ecological and economic balance and the structure of land use in the basin of the Tumannaya River 316

© Автор 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.34

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.223-242>
<https://www.elibrary.ru/kttdqi>

Исследование сейсмотектонических деформаций земной коры Алтае-Саянской горной области. Часть I

Н. А. Сычева

@ E-mail: ivtran@mail.ru

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Россия

Резюме. Исследованы сейсмотектонические деформации (СТД) земной коры Алтае-Саянской горной области. Расчет СТД выполнен на основе подходов, предложенных в работах Ю.В. Ризниченко и С.Л. Юнга. Оценка распределения сейсмичности, расчет среднегодовой скорости СТД (интенсивность СТД) выполнены на основе каталога землетрясений, произошедших за 1997–2020 гг. (15 669 событий). Выделены области проявления сейсмической активности и интенсивных сейсмотектонических деформаций. Высокий уровень сейсмичности и среднегодовой скорости СТД (10^{-7} год $^{-1}$) отмечается в областях, где произошли крупные сейсмические события (Чуйское – 27 сентября 2003 г., Тувинские – 27 декабря 2011 и 26 февраля 2012 г.). Исследование направленности СТД основано на данных о фокальных механизмах очагов землетрясений (591 событие), произошедших с 1963 по 2021 г. Для построения карты СТД использована классификация режимов СТД. По картам СТД определено направление осей укорочения, которое меняется с запада на восток от северо-западного до северо-восточного. Для исследуемой территории характерно разнообразие деформационных обстановок: сжатие, транспрессия, горизонтальный сдвиг, транстенсия, растяжение и др. На основе усредненных тензоров деформации рассчитаны и построены карты распределения коэффициента Лодэ–Надаи, угла обобщенно-плоской деформации, вертикальной компоненты. На исследуемой территории выделяются зоны, где проявляются различные режимы деформации – простое сжатие, преобладание простого сжатия, сдвиг, преобладание простого растяжения и простое растяжение. В зависимости от режима деформации отмечается как воздымание, так и опускание земной коры.

Ключевые слова: землетрясение, фокальный механизм, режимы СТД, удлинение и укорочение осей деформаций, интенсивность СТД, коэффициент Лодэ–Надаи, Алтае-Саянская горная область

Study of seismotectonic deformations of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region. Part I

Naylya A. Sycheva

@ E-mail: ivtran@mail.ru

Schmidt Institute of Earth Physics of the Russian Academy of Sciences, Russia

Abstract. Seismotectonic deformations (STD) of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region were studied. The STD calculation was performed on the basis of the approaches proposed in the works of Yu.V. Riznichenko and S.L. Yunga. Estimation of seismicity distribution and calculation of the average annual STD velocity (STD intensity) were made on the basis of the catalog of earthquakes that occurred in 1997–2020 (15 669 seismic events). Areas of manifestation of intense seismotectonic deformations and seismic activity are identified. A high level of seismicity and the average annual STD velocity (10^{-7} year $^{-1}$) is noted in the areas where strong seismic events occurred (Chuya earthquake on September 27, 2003, Tuva earthquakes on December 27, 2011 and February 26, 2012). The study of STD directionality is based on data on the focal mechanisms of earthquake sources (591 events) that occurred from 1963 to 2021. The classification of STD modes was used to construct the STD map. According to the STD maps, the direction of the shortening axes was determined, which changes from west to east from northwest to northeast. The study area is characterized by a variety of deformation conditions: compression, transpression, strike-slip, transtension, tension, etc. Based on the averaged strain tensors, the distributions of the Lode–Nadai coefficient, angle of generalized plane strain, and vertical component are calculated and plotted. The zones where various modes of deformation, such as simple compression, the predominance of simple compression, shear, the predominance of simple tension and simple tension

are manifested, are distinguished in the study area. Both uplift and subsidence of the Earth's crust are noted in the study area depending on the deformation mode.

Keywords: earthquake, focal mechanism, STD modes, elongation and shortening of strain axes, STD intensity, Lode–Nadai coefficient, Altai-Sayan region

Для цитирования: Сычева Н.А. Исследование сейсмотектонических деформаций земной коры Алтае-Саянской горной области. Часть I. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 3, с. 223–242. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.223-242>; <https://www.elibrary.ru/ktttdqi>

For citation: Sycheva N.A. Study of seismotectonic deformations of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region. Part I. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 223–242. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.223-242>; <https://www.elibrary.ru/ktttdqi>

Финансирование

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (№ 122040600089-4).

Funding

The work was conducted within the framework of state task of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (no. 122040600089-4).

Введение

Тектоническая структура Алтае-Саянской области, согласно представлениям плитной тектоники, формировалась в составе Палеоазиатского океана в течение позднего докембрия и палеозоя [1–3] вследствие его раскрытия и закрытия, т.е. полного «цикла Вильсона». Палеоазиатский океан разделил Сибирский и Северо-Китайский континенты и достиг наибольших размеров в венде – раннем кембрии [3]. В дальнейшей длительной, протекавшей в течение всего палеозоя «аккреции материала в зоне субдукции» и полного сокращения площади океанической коры сложилась современная тектоническая структура Алтае-Саянской области [1, 3–6]. Она представлена разнообразными по происхождению и возрасту структурными комплексами – фрагментами древних континентов и океанической коры, островных вулканических дуг и континентальных окраин, аккреционных и коллизионных зон, микроконтинентов и др. [4].

Алтае-Саянское нагорье – область активно-го горообразования, продолжающегося и в наши дни, свидетельством чему служат многочисленные сильные землетрясения современности. На рис. 1 представлено положение эпицентров крупнейших землетрясений, современных и произошедших в доинструментальный период. Крупнейшие землетрясения с магнитудой 7–8 произошли преимущественно на территории Монголии и Китая. В инструментальный период зарегистрированы и хорошо изучены с сейсмологической точки зрения Зайсанское [7], Бусингольское [8], Чуйское [9], Култукское [10], Тувинские [11], Бачатское землетрясения [12–

13]. Последнее в представленном списке относятся к техногенным землетрясениям [14].

Ежегодные измерения с использованием технологий космической геодезии – метода GNSS (Global navigation satellite system) на рассматриваемой территории (рис. 1) проводятся с 2000 г. [16–19]. Измерения ведутся в рамках трех отдельных геодезических сетей: сеть Института земной коры Сибирского отделения РАН, расположенная на территории Байкальской рифтовой зоны, западной Монголии (включая Монгольский и Гобийский Алтай) и гор Тувы и Западного Саяна; сеть Научной станции РАН в г. Бишкеке, распространяющаяся от Тянь-Шаня на север до казахского Алтая, а также сеть Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН), расположенная на территории российского Алтая и Западного Саяна. Современная картина смещений для территории Горного Алтая и Саян определяется несколькими эффектами – тектоническими, связанными в основном с влиянием коллизии Индийской и Евразийской плит, и быстрыми сейсмическими, связанными с сильными землетрясениями региона [2, 20–25]. В работе [26] проведена оценка тектонических составляющих современных движений, исключая влияние косейсмических смещений, в Саянском и Тувинском регионах. Решение получено относительно Евразийской плиты. В среднем по указанным регионам для периода 2000–2011 гг. получено смещение на СВВ с годовой скоростью 0.8–1.1 мм. Ошибка определения смещения может быть оценена в 0.5–0.6 мм.

Скорости вертикальных движений в Саянском регионе не превышают 5 мм/год. Анализ горизонтальных движений по сети пунктов показал смещение на СВВ области Западного Саяна и Тувы со скоростью 0.8–1.2 мм/год.

Наиболее интересные с точки зрения исследования современной геодинамики Алтая данные получены к настоящему времени в результате наблюдений на сети ИНГГ СО РАН [26]. В течение периода наблюдений на этой сети произошло сильное Чуйское землетря-

сение 27.09.2003, $M = 7.3$, что позволило использовать данные о скоростях движений, полученные в пунктах сети, для изучения подготовки землетрясения, косейсмической под-
вижки и постсейсмической релаксации.

В целом Алтае-Саянская область находится в условиях фонового горизонтального сжатия, но, несмотря на это, на территории встречаются блоки «рифтового» или грабенового типа с близгоризонтальными максимальными удлинениями и близвертикальными мак-

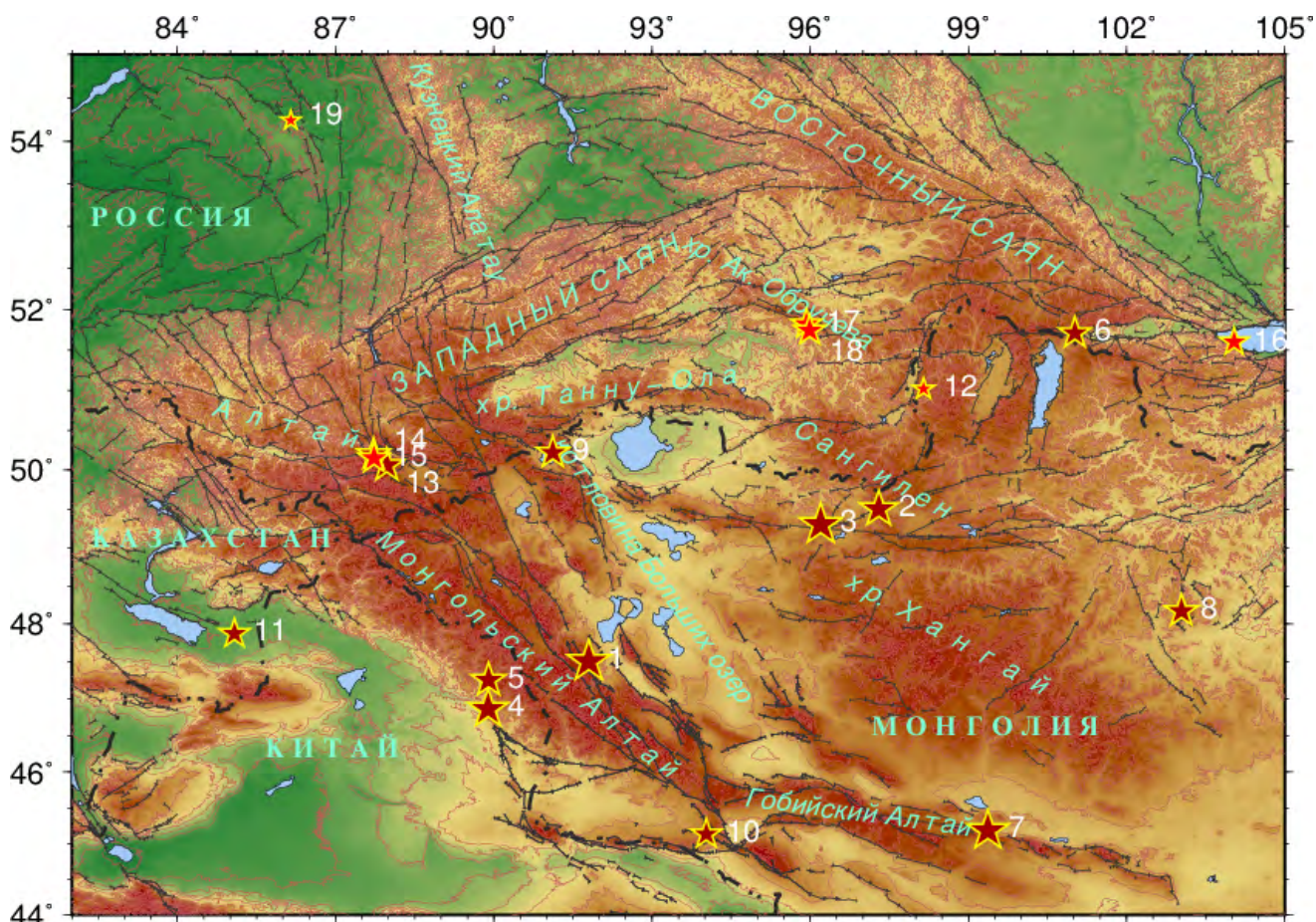


Рис. 1. Алтае-Саянская горная область. Звездочки – эпицентры исторических и современных сильных землетрясений: темно-красные – с $M \geq 7$; красные – с $6 \leq M < 7$. Серые линии – региональные и локальные разломы по [15]. Штрих-пунктирные линии – государственные границы. Арабские цифры – номера землетрясений: 1 – В. Монгольское, 1761, $M = 8.3$; 2 – Танну-Ольское, 1905, $M = 7.6$; 3 – Болнайское, 1905, $M = 8.3$; 4 – Фуюнское, 1931, $M = 7.9$; 5 – афтершок Фуюнского, 1931, $M = 7.3$; 6 – Мондинское, 1950, $M = 7.0$; 7 – Гобиалтайское, 1957, $M = 8.1$; 8 – Могодское, 1967, $M = 7.0$; 9 – Урэг-Нурское, 1970, $M = 7.0$; 10 – Тахийншарское, 1974, $M = 6.8$; 11 – Зайсанское, 1990, $M = 6.8$; 12 – Бусингольское, 1991, $M = 6.4$; 13 – Чуйское, 2003, $M = 7.3$; 14 – афтершок Чуйского, 2003, $M = 7.0$; 15 – афтершок Чуйского, 2003, $M = 6.9$; 16 – Култукское, 2008, $M = 6.4$; 17 – Тувинское I, 2011, $M = 6.6$; 18 – Тувинское II, 2012, $M = 6.8$; 19 – Бачатское, 2013, $M = 6.1$.

Fig. 1. The Altai-Sayan mountain region. Asterisks are the epicenters of historical and modern strong earthquakes: dark-red – with $M \geq 7$; red – with $6 \leq M < 7$. Gray lines are regional and local faults according to [15]. Dash-dotted lines are state borders. Arabic numerals are the earthquake numbers: 1 – the Great Mongol earthquake, 1761, $M = 8.3$; 2 – the Tannu-Ola, 1905, $M = 7.6$; 3 – the Bolnai, 1905, $M = 8.3$; 4 – Fuyun, 1931, $M = 7.9$; 5 – aftershock of the Fuyun earthquake, 1931, $M = 7.3$; 6 – Mondy, 1950, $M = 7.0$; 7 – Gobi-Altay, 1957, $M = 8.1$; 8 – Mogod, 1967, $M = 7.0$; 9 – Ureg-Nur, 1970, $M = 7.0$; 10 – Takhiinshar, 1974, $M = 6.8$; 11 – Zaisan, 1990, $M = 6.8$; 12 – Busingol, 1991, $M = 6.4$; 13 – Chuya, 2003, $M = 7.3$; 14 – aftershock of the Chuya earthquake, 2003, $M = 7.0$; 15 – aftershock of the Chuya earthquake, 2003, $M = 6.9$; 16 – Kultuk, 2008, $M = 6.4$; 17 – Tuva I, 2011, $M = 6.6$; 18 – Tuva II, 2012, $M = 6.8$; 19 – Bachat, 2013, $M = 6.1$.

симальными укорочениями, расположенные в восточной части Тоджинской котловины, на флангах озерных впадин Алаколь, Тере-Холь, Зайсан, к северо-северо-востоку от оз. Убсунур и в Чуйской степи [27]. Два крупных блока «орогенного» типа с близвертикальным удлинением и близгоризонтальным укорочением выявлены в северной части Монгольского Алтая и в пределах хр. Академика Обручева с прилегающей к нему с юга территорией. Общий характер поля деформаций очень сложен, земная кора района разбита на многочисленные, по-разному деформированные блоки. На фоне в общем мозаичного поля деформаций наиболее устойчиво прослеживаются траектории максимального укорочения. В Монгольском Алтае, частично в Горном Алтае и вблизи оз. Зайсан они ориентированы в диагональном, северо-западном направлении, а в Западном и Восточном Саянах, Туве и северной части Монголии – в северо-восточном. Видимо, такая ориентировка максимального укорочения обусловлена фоновым сжатием, которое играет определяющую роль при деформации земной коры [27–31].

В связи с актуальностью исследования напряженного состояния горных пород сейсмоактивных регионов и активных разломных структур в задаче прогноза землетрясений [32–34] важной задачей является получение данных о фокальных механизмах очагов. Не будет преувеличением отметить, что они поставляют едва ли не основную информацию о напряженном состоянии земных недр на глубинах, недоступных для непосредственного изучения.

Определенные варианты тектонофизической интерпретации механизмов очагов позволяют подойти к проблеме определения направленности современного сейсмотектонического деформационного процесса. В конце XX и в начале XXI в. для оценки напряженно-деформированного состояния земной коры активно применялся расчет сейсмотектонических деформаций [35, 36] (метод СТД). Основным приемом исследования в методе СТД являются статистические операции над матрицами, описывающими механизм очага землетрясения. В то же время геомеханический смысл расчеты приобретают в результате приложения методов механики сплошных

сред. В последние годы активно развивается и используется метод катакластического анализа разрывных смещений (МКА), разработанный в лаборатории тектонофизики Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН [37, 38]. В результате анализа совокупностей механизмов очагов землетрясений МКА позволяет не только получать данные об ориентации осей главных напряжений и о значении коэффициента Лоде–Надаи (аналогично методу СТД), но и определять относительные значения максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления (тектоническое давление, из которого вычтено давление флюида в трещинно-поровом пространстве пород).

Различие СТД и МКА состоит и в разном подходе при формировании анализируемой выборки. В первом случае она создается отбором из каталога землетрясений, попадающих в область осреднения, с определенным радиусом и с центром в узловой точке. Вклад каждого события определяется весовым коэффициентом, зависящим от магнитуды землетрясения. В дальнейшем рассматриваются те области осреднения, в которых коэффициент k (каппа, т.е. интенсивность результирующей матрицы) превышает это значение из таблицы в [35, с. 88–89], где представлены мода и критические значения параметра k , соответствующие разным кумулятивным вероятностям (90 и 95 %) и объему выборки (см. таблицу, в ней приведены некоторые данные из указанного источника). Во втором случае (МКА) расчет тензоров напряжений и приращений сейсмотектонических деформаций выполняется на основе проверки данных (фокальных механизмов) на однородность. Здесь используется критерий кумулятивности (взаимное пересечение) областей упругой разгрузки землетрясений и критерий диссипации упругой энергии для каждого землетрясения на искомом тензоре напряжений. Использование этих критериев позволяет создать однородную выборку, характеризующую квазиоднородное деформирование отвечающего ей пространственного домена. Размер такого домена, к которому относятся результаты расчета, зависит от плотности распределения землетрясений и их магнитуд. Расчет выполняется для доменов, в который попали 6 и более землетрясений [25].

Таблица. Мода M и критические значения параметра κ , соответствующие разным кумулятивным вероятностям и объему выборки (N) [35]

Table. Mode M and critical values of the parameter κ corresponding to the different cumulative probabilities and sample size (N) [35]

N	M	κ 90 %	κ 95 %
5	0.400	0.597	0.645
7	0.347	0.507	0.551
10	0.284	0.424	0.463
15	0.230	0.348	0.377
20	0.199	0.299	0.327
35	0.161	0.225	0.247
55	0.114	0.182	0.199
100	0.088	0.135	0.147
700	0.042	0.076	0.087
1000	0.031	0.050	0.053

Из различных источников (публикации, специализированные сайты и др.) нами собраны данные о фокальных механизмах 591 землетрясения Алтае-Саянской области с $M > 2$, которые могут быть использованы для оценки напряженно-деформированного состояния. Особенности формирования анализируемых выборок и условия небольшой плотности распределения данных определяют предпочтительность использования в данном случае метода СТД, который описан во многих работах [35, 36, 39] и остается актуальным в настоящее время [40–42].

Целью данной работы является расчет СТД Алтае-Саянской области на основе данных о фокальных механизмах землетрясений (591 событие), произошедших на этой территории с 1963 по 2021 г.

Наряду с результатами расчета СТД в работе представлены некоторые характеристики сейсмического процесса и интенсивности СТД.

Методика и материалы

Для совокупности землетрясений, произошедших в объеме среды V за период времени T , вызванная ими усредненная неупругая деформация описывается тензором скорости разрывной (сейсмотектонической) деформации $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ [35, 36]:

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)} m_{ij}^{(\alpha)}, \quad (1)$$

где суммирование проводится по сейсмическим событиям, нумерованным с помощью индекса α . В выражении (1) N – количество событий, $M_0^{(\alpha)}$ – сейсмический момент землетрясения с номером α , $m_{ij}^{(\alpha)}$ – направляющий тензор механизма, μ – модуль сдвига, V – исследуемый объем и T – время исследования. В случае, когда период времени выражен в годах, тензор $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ также называют среднегодовым приростом сейсмотектонической деформации.

Используя предположение о подобии СТД на разных масштабных уровнях (подобии подвижек в очагах землетрясений в широком диапазоне энергий – проверка проведена в ряде работ, и, как известно, найдено подтверждение наличия подобия [43]), это выражение можно преобразовать к виду [35]

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)} \cdot \sum m_{ij}^{(\alpha)} = I_{\Sigma} \cdot \frac{\sum_{\alpha=1}^N w^{(\alpha)} \cdot m_{ij}^{(\alpha)}}{\sum_{\alpha=1}^N w^{(\alpha)}}, \quad (2)$$

где $w^{(\alpha)}$ – вес отдельного события, определяемый из весовой функции w , а I_{Σ} определяется выражением

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)} \quad (3)$$

и принимается за интенсивность деформации [39]. Весовая функция w , используемая для определения вклада каждого события, описана в [43].

При проведении расчетов направленности сейсмотектонической деформации посредством осреднения исходных данных геоструктурная область подразделяется на элементарные подобласти с некоторым радиусом, центры которых размещаются в узлах (узловые точки) специально выбранной сетки.

Установление в работе [35] взаимно-однозначного соответствия между множеством тензоров сейсмических моментов и трехмерной поверхностью сферы в 4D-пространстве открывает возможности эффективно использовать при изучении механизмов очагов развитые в теории классификации классические

подходы, а также обеспечивает оптимальное графическое отображение как исходных данных, так и результатов расчетов. На основе этого соответствия С.Л. Юнга предложил схему классификации режимов сейсмотектонической деформации, в которой выделяется 11 режимов. Теория, описывающая подход, на котором основана классификация режимов СТД, представлена во многих работах [35, 44], более подробно этот вопрос рассматривается в наших с соавторами публикациях [45, 46] и здесь не приводится.

Расчет СТД проводился с использованием «Автоматизированного рабочего места сейсмолога для исследования фокальных механизмов, расчета и картирования сейсмотектонических деформаций», авторское свидетельство на которое получено В.Н. Сычевым и Н.А. Сычевой в 2018 г.

Коэффициент Лодэ–Надаи. Согласно [45, 46], отдельные компоненты тензора средней сейсмотектонической деформации дают представление об изменении размеров ячейки осреднения в направлении координатных осей или их формы в соответствующих координатных плоскостях. Однако по этим данным достаточно трудно представить себе деформацию элементарной ячейки в целом. Обойти эту трудность позволяет использование некоторых параметров, описывающих характер деформирования в терминах теории упругости, в частности с помощью коэффициента Лодэ–Надаи. Этот коэффициент определяет вид деформации и выражается через главные значения тензора деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ следующим образом [47]:

$$\mu_\varepsilon = 2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} - 1. \quad (4)$$

При $\mu_\varepsilon = 1$ деформация имеет вид простого (одноосного) сжатия; при $\mu_\varepsilon > 0.2$ преобладает деформация сжатия; при $\mu_\varepsilon = -1$ имеем простое (одноосное) растяжение; при $\mu_\varepsilon < -0.2$ растяжение преобладает, а при $-0.2 \leq \mu_\varepsilon \leq 0.2$ имеет место простой сдвиг (чистый сдвиг). Определение главных значений тензора представляет собой классическую задачу теории упругости [48].

Угол плоской деформации (ω). ω – угол вида напряженного состояния, имеющий тот же смысл, что и фаза тензора-девиатора ω_s ,

по определению в [49]. Параметр ω , как и параметр Лодэ–Надаи, в нашем случае характеризует тензор сейсмотектонической деформации (т.е. деформации, а не напряжений). Тем не менее удобно пользоваться названием «угол вида напряженного состояния», которое было введено в работах С.Л. Юнга и уже стало традиционным [35, 43]. По Юнге, угол ω может изменяться в пределах $0 \leq \omega \leq \pi$. Картирование значений угла ω позволяет уточнить расположение зон, где для СТД наиболее выражены режимы простого (одностороннего) сжатия или растяжения. В работе также рассмотрено распределение *вертикальной компоненты усредненных механизмов очагов*, которая визуальнo не отражается на картах направленности СТД [44]. Значение вертикальной компоненты отражает вертикальные движения земной коры: отрицательные значения указывают на ее опускание, положительные – на воздымание.

Каталог землетрясений. Для количественной оценки сейсмичности и интенсивности СТД использовался каталог землетрясений, сформированный нами из приложений к ежегодникам «Землетрясения Северной Евразии» (<http://www.ceme.gsras.ru/zse/>) и «Землетрясения России» (<http://www.ceme.gsras.ru/zr/>) за 1997–2020 гг. по регионам «Алтай и Саяны» и «Прибайкалье, Забайкалье» Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) (<http://www.ceme.gsras.ru/new/catalog/>). Каталог включает 15 669 землетрясений. Ранее в работе [50] было установлено, что представительная часть каталога включает землетрясения с $M \geq 2$.

Каталог фокальных механизмов содержит данные о механизмах 591 землетрясения, произошедшего на исследуемой территории с 1963 по 2021 г. Эпицентральное положение землетрясений представлено на рис. 2. Цвет кружка обозначает принадлежность к одному источнику данных (см. подпись к рисунку). Для оценки плотности распределения землетрясений вся рассматриваемая территория разбита на ячейки размером $2 \times 2^\circ$ ($\sim 200 \times 200$ км, ~ 58 ячеек) и определено количество событий в каждой ячейке. Землетрясения расположены в 48 ячейках (~ 84 % территории). Макси-

мальное количество землетрясений в ячейке составляет 71 событие (одна ячейка с центром 52° с.ш. и 98° в.д.), в 9 ячейках произошло по одному, а в остальных более одного события. Графически отображение количества земле-

трясений по ячейкам представлено фоном (см. рис. 2).

Некоторые статистические характеристики каталога фокальных механизмов представлены на рис. 2. ~25 % землетрясений имеют

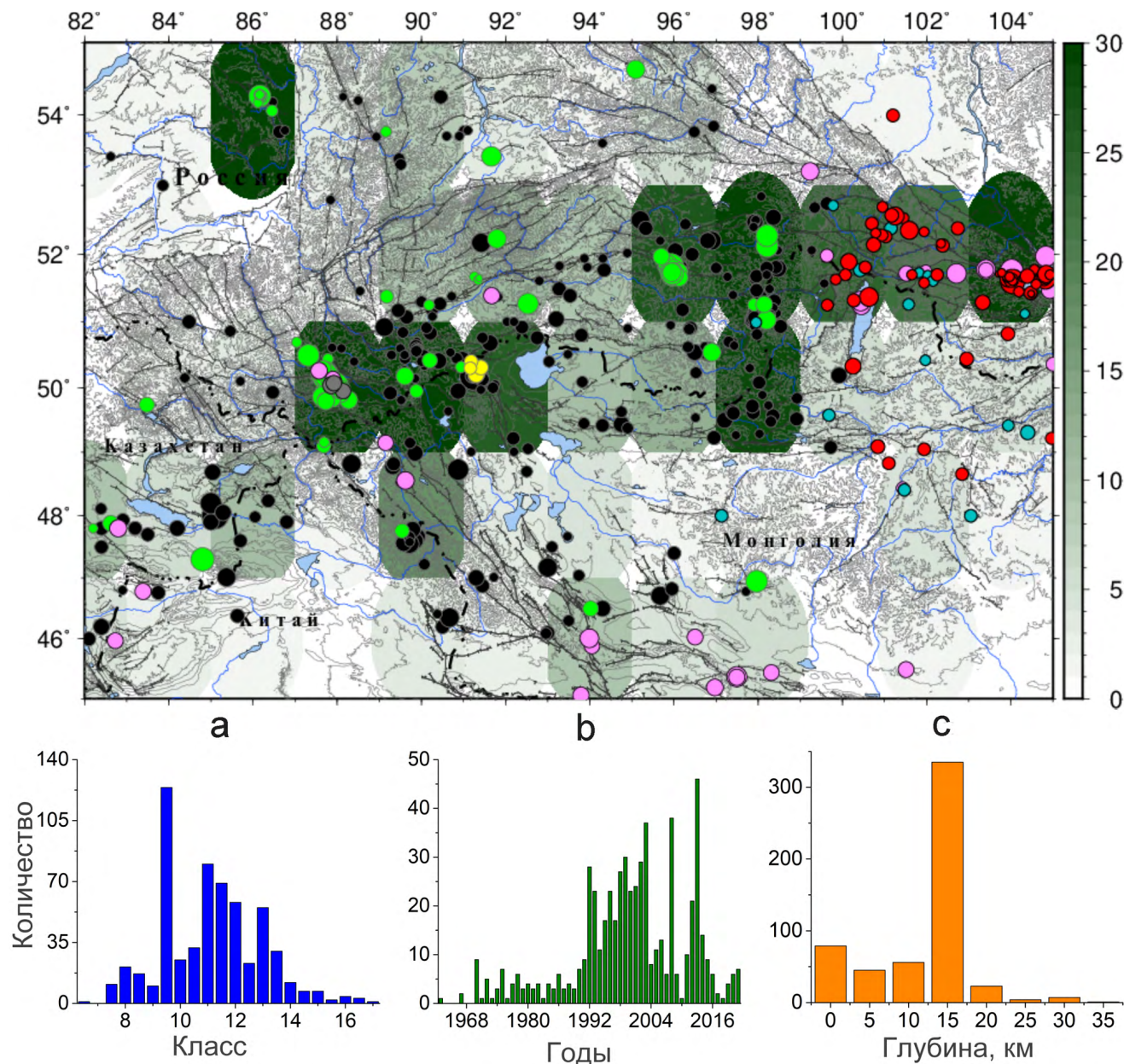


Рис. 2. Эпицентры землетрясений из каталога фокальных механизмов (591 событие) на фоне плотности распределения событий. Цвет кружка определяет принадлежность к источнику данных: черный – ИНГГ СО РАН; зеленый – Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН; розовый – CMT (www.globalcmt.org/CMTsearch.html); желтый – [51]; серый – [52]; бирюзовый – [53]; красный – Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН; синий – другие источники (5 событий). Серыми линиями отмечены региональные и локальные разломы по [15]. Штрих-пунктирные линии – государственные границы. Внизу графики, отражающие количественное распределение землетрясений из каталога фокальных механизмов: а – по классу; б – по годам; с – по глубине.

Fig. 2. Earthquake epicenters from the catalog of focal mechanisms (591 events) against the background of event distribution density. The color of the circle determines the belonging to the data source: black – IPGG SB RAS (Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the RAS); green – Altai-Sayan Branch of the FRC UGS RAS; pink – CMT (www.globalcmt.org/CMTsearch.html); yellow – [51]; gray – [52]; turquoise – [53]; red – Baikal branch of the FRC UGS RAS; blue – other sources (5 events). Gray lines are regional and local faults according to [15]. Dash-dotted lines are state borders. At the bottom there are the graphs of quantitative distribution of the earthquakes from the catalog of focal mechanisms: a – by class; b – by years; c – in depth.

класс $K = 9.5$ ($M = 3.25$). Наиболее равномерно представлен период с 1993 по 2003 г. Максимальное число событий приходится на 2013 г. 18 июня 2013 г. произошло Бачатское землетрясение с $M_L = 6.1$ (см. рис. 1), которое сопровождалось афтершоковой активностью.

Карта фокальных механизмов. На рис. 3 представлена карта фокальных механизмов очагов, где цвет фокального механизма обозначает тип подвижки. Для определения типа механизма использовались значения углов погружения главных осей напряжений (P *plunge*

и T *plunge*). На рассматриваемой территории отмечается разнообразие механизмов очагов. Согласно полученным данным, ~39 % от общего числа событий составляют взбросы и взбросо-сдвиги, ~25 % – горизонтальные сдвиги и взрезы, ~36 % – сбросы и сбросо-сдвиги.

Глубинное распределение землетрясений представлено на интегральных проекциях на вертикальную плоскость (рис. 4). Выполнены два разреза: в направлениях запад–восток и север–юг. Эти построения позволили отметить, что в исследуемом регионе землетрясения

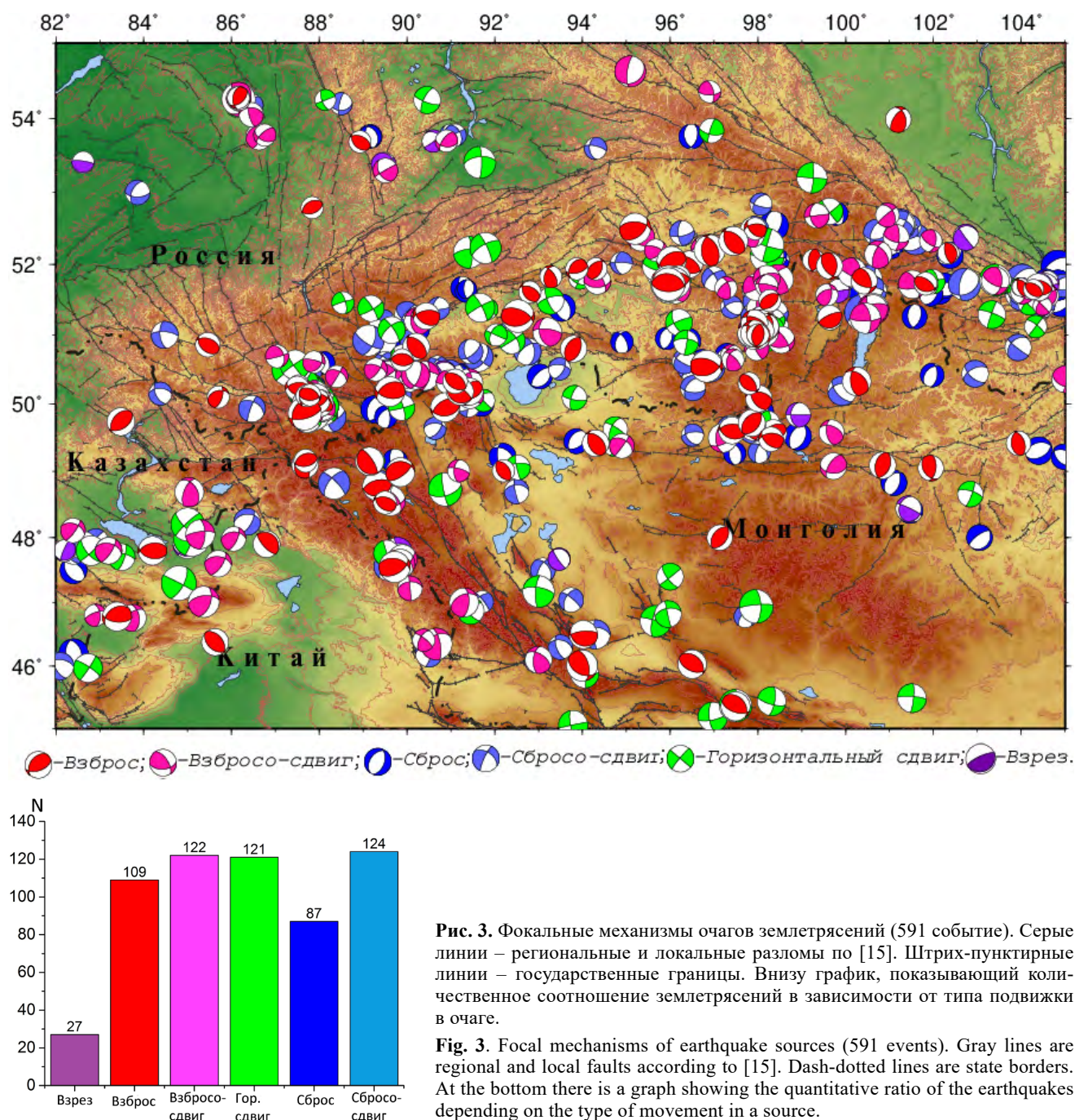


Рис. 3. Фокальные механизмы очагов землетрясений (591 событие). Серые линии – региональные и локальные разломы по [15]. Штрих-пунктирные линии – государственные границы. Внизу график, показывающий количественное соотношение землетрясений в зависимости от типа подвижки в очаге.

Fig. 3. Focal mechanisms of earthquake sources (591 events). Gray lines are regional and local faults according to [15]. Dash-dotted lines are state borders. At the bottom there is a graph showing the quantitative ratio of the earthquakes depending on the type of movement in a source.

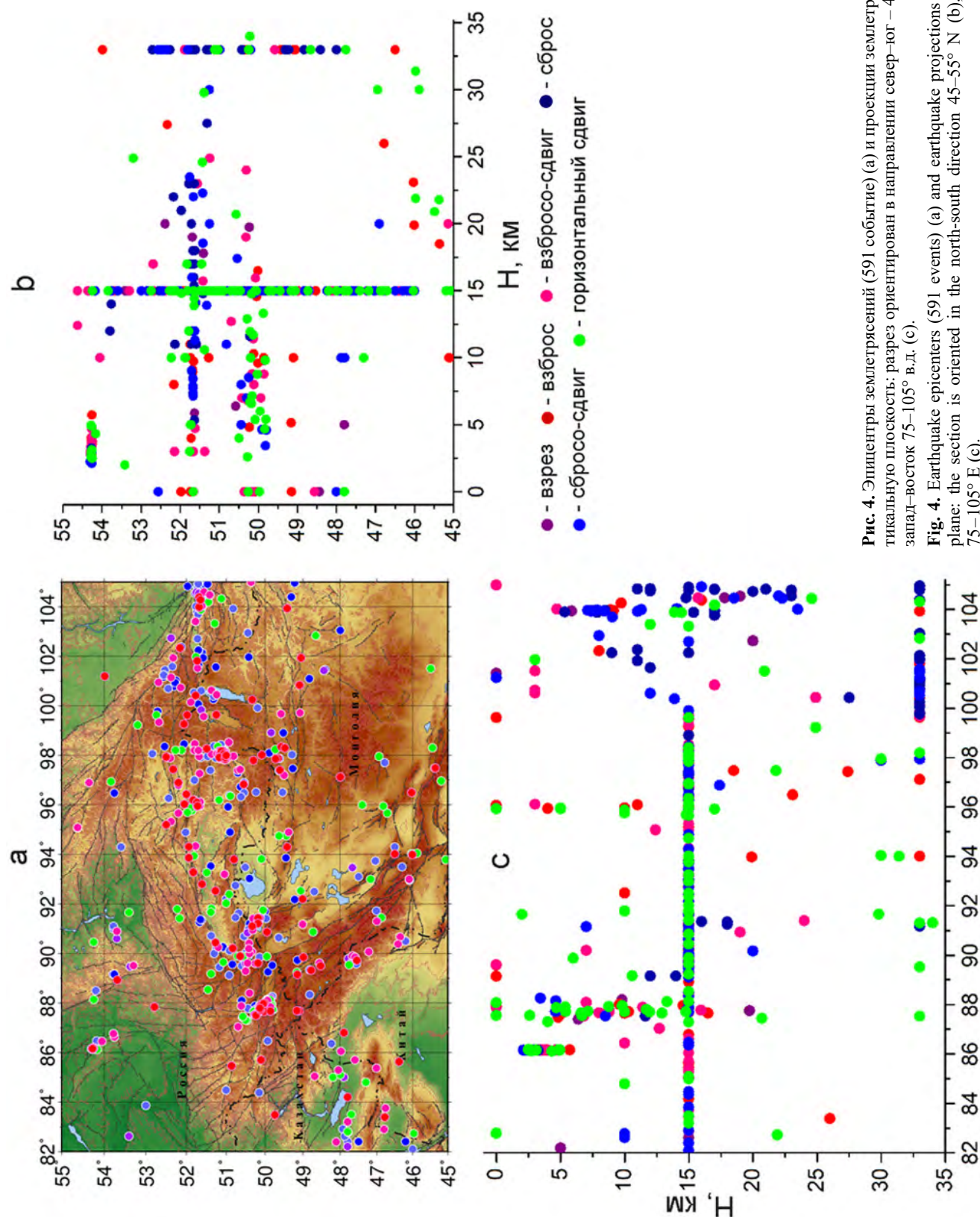


Рис. 4. Эпицентры землетрясений (591 событие) (a) и проекции землетрясений на вертикальную плоскость: разрез ориентирован в направлении север-юг – 45–55° с.ш. (b), запад-восток 75–105° в.д. (c).

Fig. 4. Earthquake epicenters (591 events) (a) and earthquake projections on the vertical plane: the section is oriented in the north-south direction 45–55° N (b), and west-east 75–105° E (c).

происходят на глубине до 35 км. 309 землетрясений из каталога имеют глубину 15 км. В работе [52], где анализируются фокальные механизмы землетрясений Алтая и Саян, отмечено, что из-за отсутствия надежного определения глубин очагов в Алтае-Саянской горной области глубина землетрясений принималась равной 15 км. Для группы землетрясений определена глубина 33 км, что может быть связано с применением годографа Джеффриса–Буллена [54]. Этот годограф используется при составлении сейсмологического бюллетеня ФИЦ ЕГС РАН. Модель Джеффриса–Буллена является одной из наиболее ранних современных моделей Земли и имеет отметку границы Мохоровичича $h = 33$ км. Землетрясения глубже 30 км происходят на территории Монгольского и Гобийского Алтая. Результаты анализа распределения землетрясений по глубине не позволяют оценить СТД на разных глубинах, как это выполнено в работах [24, 55] при исследовании напряженного состояния эпицентральной области Чуйского землетрясения 2003 г., где отмечено изменение поля напряжений на локальном уровне в зависимости от глубины. В дальнейшем при расчете СТД будем рассматривать слой земной коры 0–35 км.

Результаты и обсуждение

Количественное распределение землетрясений и интенсивность СТД

Для исследуемой территории построены карты распределения количества землетрясений в год (позволяют определить зоны сейсмической активности) и среднегодовой скорости СТД (интенсивность СТД). Согласно выражению (3), интенсивность СТД является количественной характеристикой, это дает возможность при ее расчете использовать данные каталога землетрясений. Наиболее известным соотношением между магнитудой M и скаляр-

ным сейсмическим моментом M_0 (Н·м) можно считать зависимость из [36]: $\lg M_0 = 1.6M + 8.4$, которую можно использовать для расчета скалярного сейсмического момента. Расчет интенсивности СТД выполняется суммированием скалярных сейсмических моментов в пределах каждой области согласно [39].

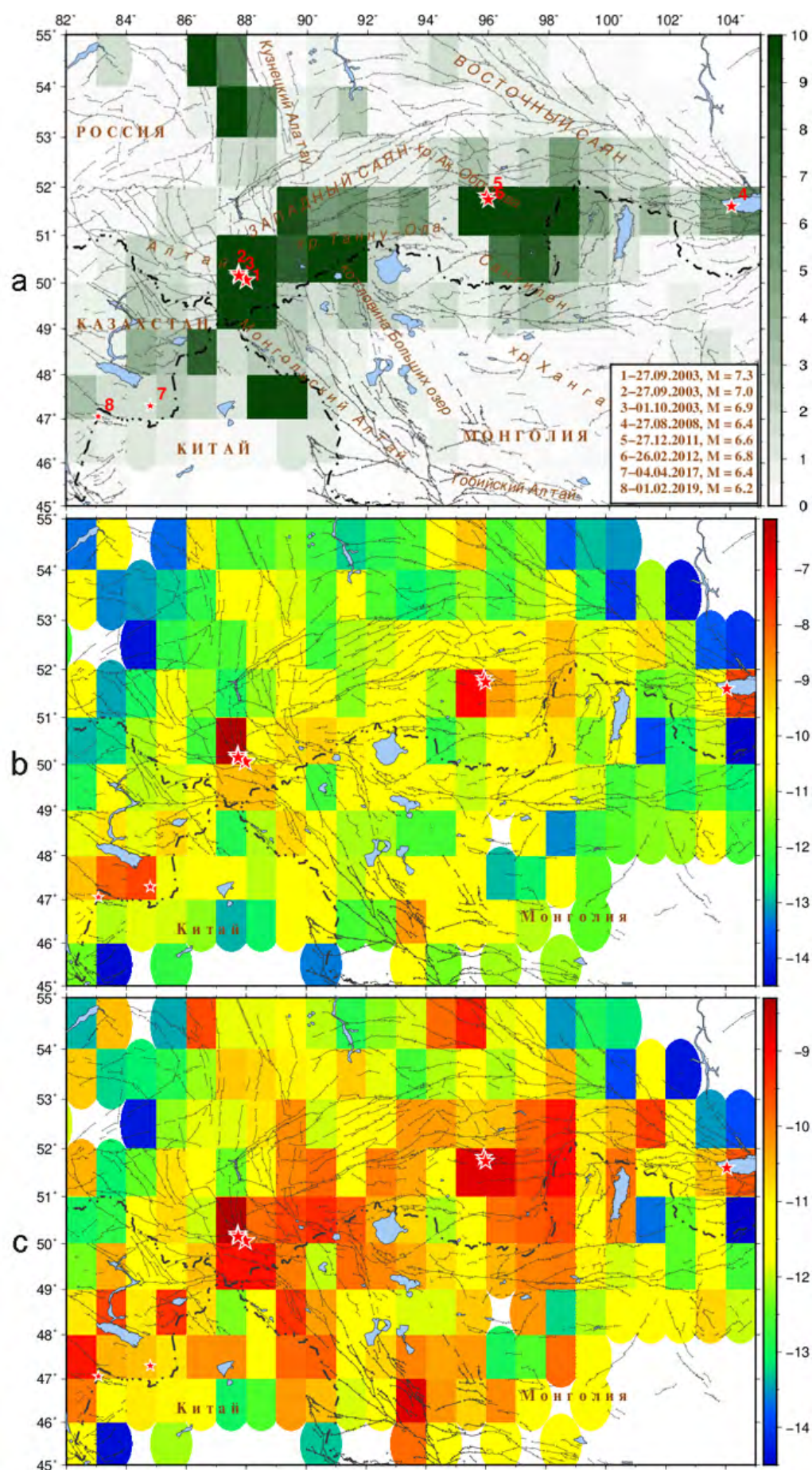
Расчет количественного распределения землетрясений и логарифма интенсивности СТД проводился в ячейках размером $1.0 \times 1.0^\circ$ (объем данных, 15 669 событий, позволяет рассматривать территорию $\sim 100 \times 100$ км), при этом учитывалась только представительная часть каталога землетрясений ($2 \leq M \leq 7.3$), который включает события, произошедшие с 1997 по 2020 г. Результаты построений представлены на рис. 4 а.

Максимальное количество землетрясений в год (73 события) произошло в ячейке с центром 50.5° с.ш. и 87.5° в.д. (область Чуйского землетрясения 2003 г.), задание верхней границы легенды ($N = 73$) привело бы к отображению только одной зоны – области Чуйского землетрясения. На эту же карту вынесены землетрясения с $M \geq 6$ (7 событий) из рассматриваемого каталога. Четыре наиболее крупных землетрясения (Чуйское и его афтершоки, Тувинские) расположены в областях с числом землетрясений в год более 10 (Горный Алтай, хр. Академика Обручева). Высокая сейсмичность этих областей обусловлена активным афтершоковым процессом этих землетрясений.

На рис. 5 б представлено распределение логарифмических значений интенсивности СТД. Высокий уровень деформации земной коры (10^{-7} год $^{-1}$) отмечается в областях, где произошли сейсмические события с $M \geq 6$ (учитываемые при расчете). Их положение также представлено на карте. Для расчета «фоновой» интенсивности СТД рассматривались землетрясения с $2 \leq M < 6$ (рис. 5 с). На полукольце из горных хребтов Гобийского, Монгольского,

Рис. 5. Распределение количества землетрясений в год (а), темно-зеленым цветом отмечены ячейки с числом землетрясений в год более 10; на врезке – дата и магнитуда события. Логарифмические значения интенсивности СТД по данным каталога землетрясений (б). Логарифмические значения интенсивности СТД по представительной части каталога землетрясений (с). Серые линии – локальные и региональные разломы по [15]. Штрих-пунктирные линии – государственные границы.

Fig. 5. Distribution of the earthquake number per year (a), the cells with an earthquake number more than 10 are highlighted in dark-green; inset shows date and magnitude of an event. Logarithmic values of the STD intensity according to the data of earthquake catalog (b). Logarithmic values of the STD intensity according to the representative part of the earthquake catalog (c). Gray lines are local and regional faults according to [15]. Dash-dotted lines are state borders.



Российского Алтая, Восточного и Западного Саян величина интенсивности СТД находится на уровне ($10^{-9} - 10^{-8}$ год $^{-1}$).

Параметры СТД

Расчет СТД выполняется суммированием матриц индивидуальных механизмов в пределах каждой элементарной подобласти. Выбор узловых точек осуществлен по двум сеткам: с шагом 0.2° (~ 20 км) и с шагом 0.33° (~ 33 км). В первом случае рассматривается область с радиусом $R = 0.25^\circ$ (~ 25 км), во втором $R = 0.35^\circ$ (~ 35 км). Первый набор параметров позволяет выделить локальные особенности, второй приводит к сглаживанию результатов.

На рис. 6 а представлена карта СТД, рассчитанная по сетке 0.33° (~ 33 км) с радиусом круговой области 0.35° (~ 35 км). Решения получены для всех узловых точек (566), где в исследуемую область попало хотя бы одно событие. Далее расчет СТД выполнялся для узловых точек, в круговой области которых 2 и более событий. Как отмечено выше, основным приемом исследования в СТД являются статистические операции над матрицами, описывающими механизм очага землетрясения. Рассмотрение 2 и более землетрясений в исследуемой области не противоречит этому подходу. Карта СТД для 152 узловых точек представлена на рис. 6 б. Для третьей части узловых точек (50 точек) решения получены по 2–5 землетрясениям, а для остальных – по 6 и более событиям. На карте представлены те области осреднения, в которых коэффициент k (интенсивность результирующей матрицы) превышает это значение из [35, с. 88–89] (см. таблицу). При расчете используется значение k , соответствующее кумулятивной вероятности 95 %.

На карте (см. рис. 6 б) режимы и направленность СТД отображены для незначительной части территории Алтая и Саян, несмотря на наличие фокальных механизмов землетрясений в других частях рассматриваемой территории. В работе [52], где рассматриваются афтершоки Чуйского и Бусингольского землетрясений, отмечено, что в очаговых областях этих землетрясений могут быть сейсмические события с различающимися типами подвижки (например, взбросы и сбросы и горизон-

тальные сдвиги). При расчете СТД попадание в рассматриваемую область осреднения землетрясений с разным типом подвижки влияет на интенсивность результирующей матрицы, которая может быть ниже критического значения параметра k , и для этой области, несмотря на достаточное количество землетрясений, решение СТД может отсутствовать.

На исследуемой территории наблюдаются разнообразные режимы деформации (рис. 6 б), что указывает на сложное напряженно-деформированное состояние исследуемой территории. На Гобийском Алтае режим СТД определен для небольшой области, которая характеризуется режимом транспрессии, ось укорочения имеет северо-северо-восточное направление. На юге Монгольского Алтая проявляется режим горизонтального сдвига. Ось укорочения имеет такое же направление. Горный Алтай и западная часть хр. Тану-Ола характеризуются режимом горизонтального сдвига. Восточные склоны хр. Академика Обручева характеризует режим сжатия, а западные – режим транспрессии. В районе Терихольской впадины действует режим сжатия, который меняется на режим транспрессии в районе Бусингольской впадины и затем в Белинской впадине сменяется режимом горизонтального сдвига. В районе оз. Хубсугул проявляется режим транстенсии. В южной части Восточного Саяна наблюдаются такие режимы, как транстенсия, растяжение, переходный режим от вертикального сдвига к растяжению и режим косого сдвига (см. рис. 6 б). В Южном Прибайкалье действует режим растяжения. Ось укорочения в районе Горного Алтая имеет северное направление, которое при движении на восток меняется на северо-северо-восточное в районе хр. Академика Обручева и на северо-восточное в районе южной части Восточного Саяна и Южного Прибайкалья.

На рис. 7 представлено распределение параметров СТД (коэффициент Лодэ–Надаи, угол вида обобщенно-плоской деформации (угол напряженного состояния по [35]), вертикальная компонента). Все три параметра определяются из усредненных тензоров деформации и характеризуют деформационный процесс. Коэффициент Лодэ–Надаи позволяет оценить тип деформации в целом; угол ω означает угол при-

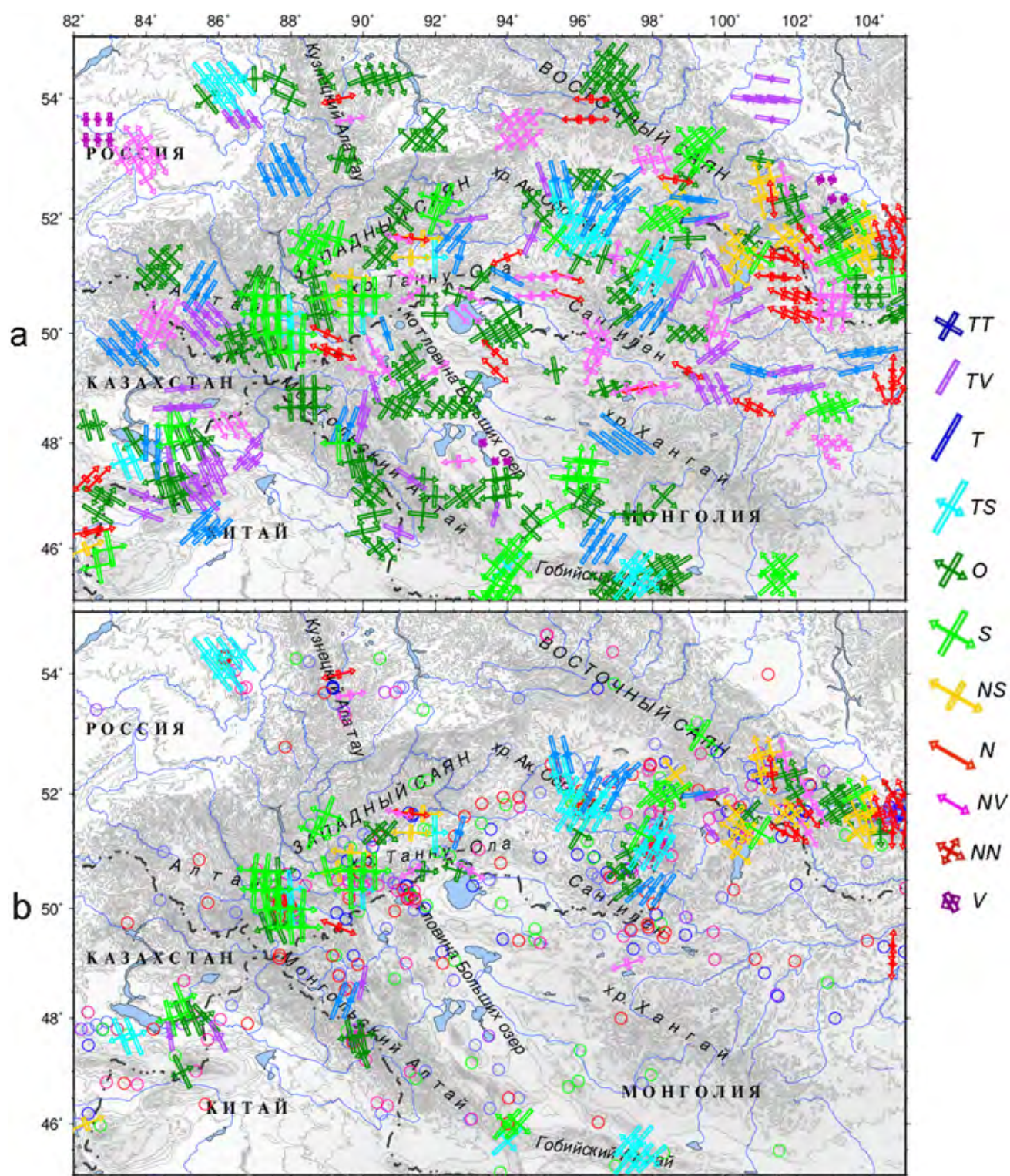


Рис. 6. Карта СТД, построенная по сетке с шагом 0.33° и с радиусом круговой области $R = 0.35^\circ$. Количество узловых точек – 566 (а) и 152 (б). Серые линии – локальные и региональные разломы по [15]. Штрих-пунктирные линии – государственные границы. Эпицентры землетрясений обозначены кружками (цвет окружности обозначает тип подвижки – см. рис. 4). Справа представлена классификация режимов СТД по С.Л. Юнге [44]: T – сжатие; N – растяжение; S – горизонтальный сдвиг; V – вертикальный сдвиг; TT – всестороннее сжатие; NN – всестороннее растяжение; O – косой сдвиг; TS – транспрессия; NS – транстенсия; TV – переходный режим от вертикального сдвига к сжатию, NV – к растяжению.

Fig. 6. STD map constructed on a grid with a step of 0.33° and with a radius of a circular area $R = 0.35^\circ$. The number of nodal points – 566 (a) and 152 (b). Gray lines are local and regional faults according to [15]. Dash-dotted lines are state borders. The earthquake epicenters are marked by circles (circle color indicates the type of movement – see Fig. 4). On the right is the classification of the STD modes according to S.L. Yunga [44]: T – compression; N – extension; S – strike-slip fault; V – vertical fault; TT – volume compression; NN – uniform extension; O – oblique fault; TS – transpression; NS – transtension; TV – transient regime from vertical fault to compression; NV – to extension.

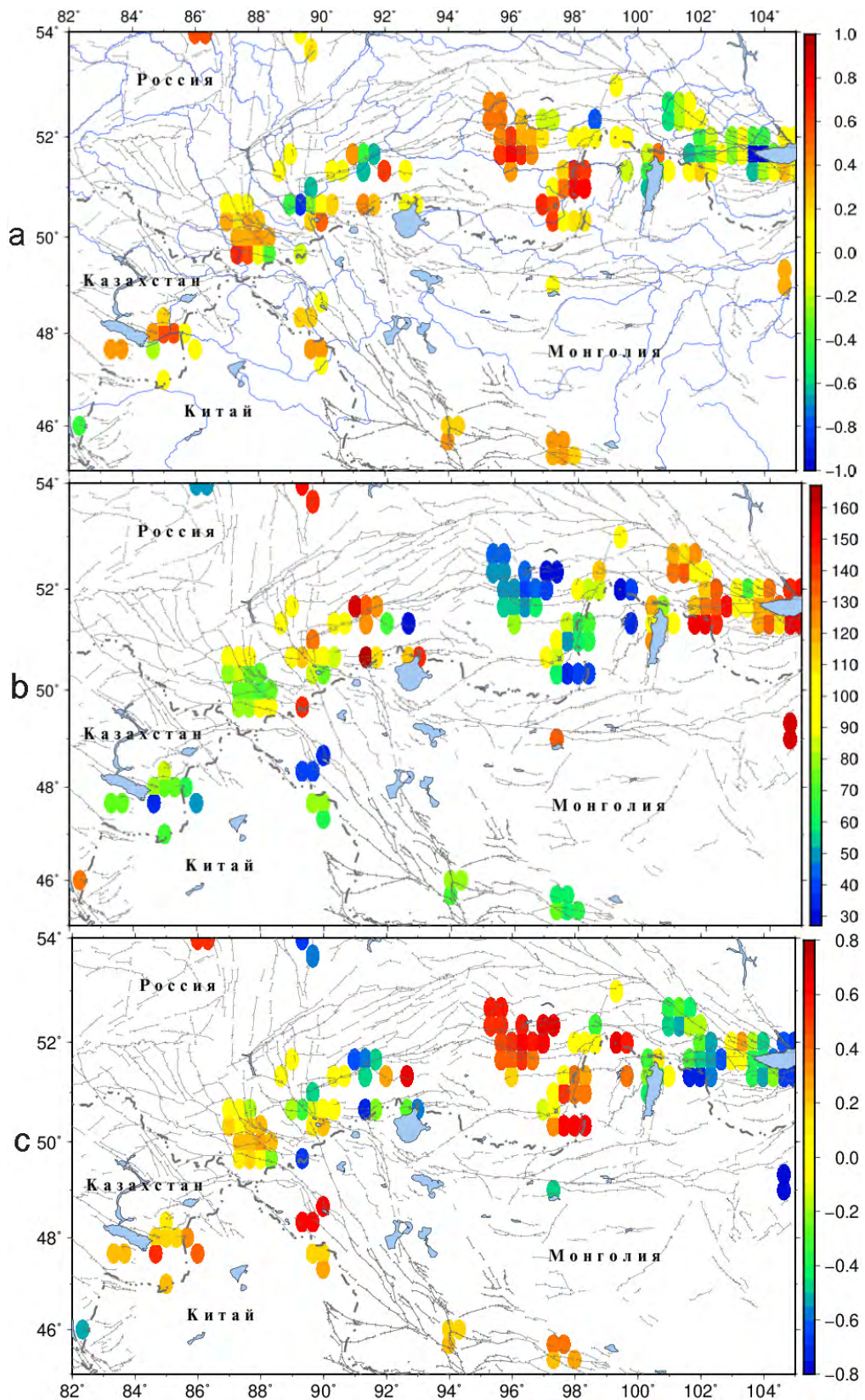


Рис. 7. Распределение параметров СТД по исследуемой территории: а – коэффициент Лодэ–Надаи; б – угол обобщенно-плоской деформации; в – вертикальная компонента усредненных тензоров деформации. Серые линии – локальные и региональные разломы по [15]. Штрих-пунктирные линии – государственные границы.

Fig. 7. Distribution of the STD parameters over the study area: а – Lode–Nadai coefficient; б – angle of generalized plane strain; в – vertical component of the averaged strain tensors. Gray lines are local and regional faults according to [15]. Dash-dotted lines are state borders.

ложения сил, приводящих к деформации; вертикальная компонента тензора деформации отражает вертикальные движения земной коры.

Для Горного Алтая коэффициент Лодэ–Надаи меняется от обычных для режима простого сжатия ($0.6 < \mu_e \leq 1$) к преобладанию простого сжатия ($0.2 < \mu_e \leq 6$) и сдвиговой деформации ($-0.2 < \mu_e \leq 0.2$). Для хр. Академика Обручева характерно простое сжатие, для системы впадин – Терехольская–Бусингольская–Белинская – преобладание простого сжатия и сдвиговые деформации. Режим простого растяжения ($-1 \leq \mu_e < -0.6$) и преобладание растяжения ($-0.6 \leq \mu_e < -0.2$) определен для южной части Восточного Саяна и Южного Прибайкалья. Минимальные значения угла ω означают, что силы, приводящие к деформации, приложены в горизонтальной плоскости, и это установлено для хр. Ак. Обручева, где, судя по значениям вертикальной компоненты, происходит воздымание земной коры. Максимальные значения угла ω характерны для южной части Восточного Саяна и Южного Прибайкалья, где имеет место опускание земной коры. Пестрая картина представленных характеристик также указывает на сложное поле деформации рассматриваемой территории и созвучна выводам, сделанным в работе [27], где отмечено, что земная кора Алтае-Саянского региона находится в состоянии горизонтального сжатия, которое в сочетании с локальными неоднородностями среды приводит к реализации разнонаправленных подвижек в очагах землетрясений и определяет блоковый, дифференцированный характер сейсмотектонических деформаций [27]. В работах [56, 57] также указано, что Алтае-Саянская складчатая область, являющаяся составной частью горной системы Центральной Азии, может рассматриваться как постоянно меняющаяся, блочная, иерархически организованная геофизическая среда. Землетрясения, регулярно происходящие в этой зоне, свидетельствуют об активно происходящем процессе разрушения земной коры и горообразования.

Заключение

На основе сейсмических данных (каталог землетрясений, 15 669 событий, 1997–2020 гг.) и данных по фокальным механизмам очагов

землетрясений (591 событие, 1963–2022 гг.) проведен анализ напряженно-деформированного состояния земной коры Алтае-Саянской области (глубина исследования 35 км).

Высокий уровень деформации земной коры (10^{-7} год $^{-1}$) отмечается в тех областях, где произошли крупные сейсмические события (Чуйское – 27 сентября 2003 г., Тувинские – 27 декабря 2011 и 26 февраля 2012 г.). «Фоновая» интенсивность СТД, рассчитанная по представительной части каталога, имеет уровень $10^{-9} - 10^{-8}$ год $^{-1}$ для территории, образующей полукольцо из горных хребтов Гобийского, Монгольского, Российского Алтая, Западного и Восточного Саяна.

Для оценки параметров напряженно-деформированного состояния исследуемой территории применен метод расчета СТД. По картам СТД определено изменение направления осей укорочения на исследуемой территории при движении с запада на восток – с северо-западного на западе до северо-восточного на востоке. На рассматриваемой территории наблюдаются все режимы деформационных обстановок (согласно классификации режимов СТД по С.Л. Юнге) – сжатие, транспрессия, горизонтальный сдвиг, транстенсия, растяжение и др., что указывает на сложное поле деформации. Судя по значениям коэффициента Лодэ–Надаи, на исследуемой территории проявляются различные режимы деформации земной коры – простое сжатие, преобладание простого сжатия, сдвиг, простое растяжение и преобладание простого растяжения. Минимальные значения угла ω наблюдаются на территории Монгольского Алтая (30°), хр. Академика Обручева ($30-40^\circ$), в районе Терехольской впадины, что означает преобладание усилий в горизонтальной плоскости. Максимальные значения этого параметра отмечаются в районе южной части Восточного Саяна и Южного Прибайкалья ($100-150^\circ$). В результате деформационных процессов воздымание земной коры испытывает территория Восточного Казахстана, Монгольский Алтай, хр. Академика Обручева и южные борты Терехольской впадины.

До настоящего времени прогноз землетрясений остается актуальной задачей для всех сейсмоактивных регионов. В работе [58] главную научную проблему видят в том, что

процесс подготовки землетрясения (тем более разные возможные его сценарии) недостаточно понят, и главную цель нового этапа мониторинговых исследований видят в получении данных в очаговых зонах, которые будут способствовать и более полному пониманию геодинамических процессов, заканчивающихся землетрясением, и построению теории физики очаговых зон.

При решении задачи прогноза землетрясений авторы многих работ [33, 59 и др.] указывают на необходимость мониторинга природного напряженного состояния, позволяющего получать данные о полном тензоре напряжений (деформаций) в земной коре и его изменениях (в частности данные о снятии напряжений в очагах землетрясений). Для дальнейшего развития и применения методов реконструкции первостепенное значение имеет наличие достаточно больших объемов данных об очаговых параметрах землетрясений. Эта работа подтверждает необходимость накопления данных об очаговых параметрах землетрясений для получения более подробной модели деформационной картины земной коры Алтае-Саянской горной области. В следующей работе мы предполагаем наиболее детально рассмотреть сейсмичность и характеристики СТД для двух областей с представительным числом данных по фокальным механизмам: Горный Алтай (область Чуйского землетрясения) и область, включающую хр. Академика Обручева, южную часть Восточного Саяна и Южное Прибайкалье.

Список литературы

- Берзин Н.А., Колман Р.Г., Добрецов Н.Л. и др. **1994**. Геодинамическая карта западной части Палеоазиатского океана. *Геология и геофизика*, 35(7–8): 8–28.
- Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Полянский О.П. **2013**. Геодинамика, поля напряжений и условия деформаций в различных геодинамических обстановках. *Геология и геофизика*, 54(4): 469–499.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. **1990**. *Тектоника литосферных плит территории СССР*. Кн. 1. М.: Недра, 328 с.
- Берзин Н.А., Кунгурцев Л.В. **1996**. Геодинамическая интерпретация геологических комплексов Алтае-Саянской области. *Геология и геофизика*, 37(5): 63–81.
- Добрецов Н.Л. **2003**. Эволюция структур Урала, Казахстана, Тянь-Шаня и Алтае-Саянской области в Урало-Монгольском складчатом поясе (Палеоазиатский океан). *Геология и геофизика*, 44(1–2): 5–27. (На англ. яз.). EDN: PARCBJ
- Буслов М.М. **2011**. Тектоника и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса: роль позд-непалеозойских крупноамплитудных сдвигов. *Геология и геофизика*, 52(1): 66–90.
- Нурмагамбетов А., Садыков А., Тимуш А.В., Хайдаров М.С., Власова А.А., Михайлова Н.Н., Сабитов М.М., Умирзакова А., Гапич В.А. **1996**. Зайсанское землетрясение 14 июня 1990 г. *Землетрясения в СССР в 1990 году*. М.: ГС РАН, с. 53–59.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Соловьев В.М., Шевкунова Е.В., Гладышев Е.А., Антонов И.А., Корабельщиков Д.Г., Подкорытова В.Г., Янкайтис В.В. и др. **2021**. Сейсмологические исследования на территории Алтае-Саянской горной области. *Российский сейсмологический журнал*, 3(2): 20–51. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.02>
- Лескова Е.В., Еманов А.А. **2006**. Характер деформаций в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения (27 сентября 2003 г., $K = 17$, Горный Алтай) по данным анализа фокальных механизмов афтершоков. *Физическая мезомеханика*, 9(1): 51–55. EDN: IJGIRL
- Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И. **2010**. Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. *Землетрясения России в 2008 году*. Обнинск: ГС РАН, с. 120.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Селезнев В.С., Фатеев А.В. **2014**. Тувинские землетрясения 27.12.2011 г., $M_L = 6.7$, и 26.02.2012 г., $M_L = 6.8$, и их афтершоки. *Доклады Академии наук*, 456(2): 223–226.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г. **2014**. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатские землетрясения 2012–2013 гг.). *Землетрясения России в 2012 году*. Обнинск: ГС РАН, с. 104–108.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г. **2014**. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г.). *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 2: 59–67. EDN: SMICZJ
- Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Будков А.М., Иванченко Г.Н. **2019**. О генезисе Бачатского землетрясения 2013 года. *Геодинамика и тектонофизика*, 10(3): 741–759. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0439>
- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. **2017**. База данных активных разломов Евразии. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(4): 711–736. <https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0314>
- Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г. **2005**. Поля смещений земной поверхности в зоне Чуйского землетрясения, Горный Алтай. *Доклады Академии наук*, 405(6): 804–809. EDN: HSKBVH
- Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Кале Э., Дучков А.Д., Запеева Е.А., Казанцев С.А., Русбек Ф., Брюникс К. **2006**. Поля и модели смещений земной

- поверхности Горного Алтая. *Геология и геофизика*, 47(8): 923–937. EDN: NDLMOV
18. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Соловьев В.М., Шибаев С.В., Петров А.Ф., Горнов П.Ю., Шестаков Н.В., Бойко Е.В., Тимофеев А.В. **2012**. Межплитные границы Дальневосточного региона России по результатам GPS измерений, сейсморазведочных и сейсмологических данных. *Геология и геофизика*, 53(4): 489–507. EDN: OWQTPX
19. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Бойко Е.В., Грибанова Е.И., Семибаламут В.М., Тимофеев А.В., Ярошевич А.В. **2012**. Скорости деформаций и смещения в эпоху сильного землетрясения на Южном Байкале. *Геология и геофизика*, 53(8): 1040–1061. EDN: PBVNQD
20. Calais E., Vergnolle M., Deverchere J., San'kov V., Lukhnev A., Amariargal S. **2002**. Are post-seismic effects of the M = 8.4 Bolnay earthquake (1905 July 23) still influencing GPS velocities in the Mongolia-Baikal area. *Geophysical Journal International*, 149(1): 157–168. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2002.01624.x>
21. Calais E., Vergnolle M., San'kov V., Lukhnev A., Miroshnitchenko A., Amarjargal S., Derverche're J. **2003**. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002): Implications for current kinematics of Asia. *Journal Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B10). <https://doi.org/10.1029/2002jb002373>
22. Jin Sh., Park P.-H., Zhu W. **2007**. Micro-plate tectonics and kinematics in Northeast Asia inferred from a dense set of GPS observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 257(3–4): 486–496. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.03.011>
23. Новиков И.С., Еманов А.А., Лескова Е.В., Баталев В.Ю., Рыбин А.К., Баталева Е.А. **2008**. Система новейших разрывных нарушений Юго-Восточного Алтая: данные об их морфологии и кинематике. *Геология и геофизика*, 49(11): 1139–1149. EDN: JXFEWV
24. Лескова Е.В., Еманов А.А. **2013**. Иерархические свойства поля тектонических напряжений в очаговой области Чуйского землетрясения 2003 года. *Геология и геофизика*, 54(1): 113–123.
25. Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. **2013**. Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саянской горной области. *Геология и геофизика*, 54(2): 271–291.
26. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Бойко Е.В., Лунев Б.В. **2014**. Поля смещений блоков Алтае-Саянского региона и эффективные реологические параметры земной коры. *Геология и геофизика*, 5(3): 481–497.
27. Рогожин Е.А., Платонова С.Г. **2002**. Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене. М.: ОИФЗ РАН, 130 с.
28. *Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии* (под ред. В.П. Солоненко, Н.А. Флоренсова). **1985**. М.: Наука, 224 с.
29. Хилько С.Д., Флоренсов Н.А., Курушин Р.А. и др. **1978**. Сейсмотектонические линейaments и палеосейсмодислокации Монгольского Алтая. В кн.: *Сейсмотектоника южных районов СССР*. М.: Наука, с. 75–88.
30. Солоненко В.П. **1973**. Палеосейсмология. *Известия АН СССР. Физика Земли*, 9: 3–16.
31. Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И. **1995**. Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области. *Геология и геофизика*, 36(10): 20–30.
32. Ребецкий Ю.Л. **2008**. Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений. В кн.: *Проблемы тектонофизики: к столетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН*. М.: ИФЗ РАН, с. 359–395.
33. Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. **2014**. Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений. *Вестник Пермского научного центра УрО РАН*, 3: 44–62. EDN: TDURFP
34. Гольдин С.В., Дядьков П.Г., Дашевский Ю.А. **2001**. Стратегия прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне. *Геология и геофизика*, 42(10): 1484–1496.
35. Юнга С.Л. **1990**. *Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций*. М.: Наука, 191 с.
36. Ризниченко Ю.В. **1985**. *Проблемы сейсмологии: Избранные труды*. М.: Наука, 408 с.
37. Ребецкий Ю.Л. **1997**. Реконструкция тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций: методические основы, поле современных напряжений Юго-Восточной Азии, Океании. *Доклады Академии наук*, 354(1): 101–104.
38. Ребецкий Ю.Л. **2007**. *Тектонические напряжения и прочность горных массивов*. М.: Академкнига, 406 с.
39. Лукк А.А., Юнга С.Л. **1979**. Сейсмотектоническая деформация Гармского района. *Известия АН СССР. Физика Земли*, 10: 24–43.
40. Lukk A.A., Shevchenko V.I., Leonova V.G. **2015**. Autonomous geodynamics of the Pamir–Tien Shan junction zone from seismology data. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 51(6): 859–877. EDN: VALVXX
41. Sycheva N.A., Mansurov A.N. **2017**. Comparison of crustal deformation rates estimated from seismic and GPS data on the Bishkek geodynamic polygon. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 809–825. <https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0318>
42. Лукк А.А., Шевченко В.И. **2019**. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа. *Физика Земли*, 4: 99–123. doi:10.31857/S0002-33372019499-123; EDN: BMXJRQ
43. Юнга С.Л. **2002**. *Изучение движений поверхности и деформаций земной коры на территории Центрального Тянь-Шаня, Казахской платформы и Алтая; создание программ обработки сейсмологических данных, проведение обработки: отчет о научно-исследовательской работе*. Геофизическая служба Российской академии наук. Обнинск, 41 с.

44. Юнга С.Л. **1997**. О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу. *Доклады Академии наук*, 352(2): 253–255.
45. Гущенко О.И. **1975**. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным). *Доклады АН СССР*, 225(3): 557–560.
46. Юнга С.Л. **1979**. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры. *Известия АН СССР, Физика Земли*, 10: 14–23.
47. Христианович С.А., Шемякин Е.И. **1969**. О плоской деформации пластического материала при сложном нагружении. *Изв. АН СССР. Механика твердого тела*, 5: 138–149.
48. Филин А.П. **1975**. *Прикладная механика твердого деформируемого тела*. Т. 1. М.: Наука, 832 с.
49. Соколовский В.В. **1969**. *Теория пластичности*. М.: Высшая школа, 608 с.
50. Сычева Н.А., Сычев В.Н. **2022**. Некоторые характеристики сейсмичности Алтая и Саян. Проблемы Геокосмоса – 2022: Материалы XIV школы-конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 3–7 окт. 2022 г. СПб.: Скифия-Принт, с. 84–92.
51. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Янкайтис В.В., Филина А.Г. **2012**. Урэг-Нурское землетрясение 15.05.1970 г., Ms = 7.0 (Монгольский Алтай): афтершоковый процесс и особенности современной сейсмичности эпицентральной области. *Геология и геофизика*, 53(10): 1417–1429.
52. Kuchai O.A. **2012**. Specific features of fields of stresses associated with aftershock processes in the Altai-Sayan mountainous region. *Geodynamics & Tectonophysics*, 3(1): 59–68. (In Russ.). doi:10.5800/GT-GT-2012-3-1-0062; EDN: PBPJRR
53. Radziminovich N.A. **2021**. Focal mechanisms of earthquakes of Southern Baikal Region and Northern Mongolia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 12(4): 902–908. (In Russ.). doi:10.5800/GT-2021-12-4-0562; EDN: VTMIGC
54. Jeffreys H., Bullen K.E. **1940**. *Seismological tables*. London: British Association for the Advancement of Science.
55. Лескова Е.В., Еманов А.А. **2014**. Некоторые свойства иерархической модели напряженного состояния эпицентральной области Чуйского землетрясения 2003 г. *Физика Земли*, 3: 92–102.
56. Гольдин С.В. **2004**. Дилатансия, переупаковка и землетрясения. *Физика Земли*, 10: 37–54. EDN: OXKDAT
57. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. **1991**. *Сейсмический процесс в блоковой среде*. М.: Наука, 96 с.
58. Гольдин С.В., Дядьков П.Г., Дашевский Ю.А. **2001**. Стратегия прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне. *Геология и геофизика*, 42(10): 1484–1496.
59. Ребецкий Ю.Л. **2008**. Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений. В кн.: *Проблемы тектонофизики: К сорокалетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН*. М.: ИФЗ РАН, 359–395.

References

1. Berzin N.A., Coleman R.G., Dobretsov N.L. et al. **1994**. Geodynamic map of the western part of the Paleo-Asian ocean. *Geologiya i Geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 35: 5–22.
2. Dobretsov N.L., Kulakov I.Yu., Polyansky O.P. **2013**. Geodynamics and stress-strain patterns in different tectonic settings. *Russian Geology and Geophysics*, 54(4): 357–380. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.03.001>
3. Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M. **1990**. [Tectonics of lithospheric plates in the territory of the USSR]. B. 1. Moscow: Nedra, 328 p. (In Russ.).
4. Berzin N.A., Kungurtsev L.V. **1996**. Geodynamic interpretation of Altai-Sayan geological complexes. *Geologiya i Geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 37(1): 56–73.
5. Dobretsov N.L. **2003**. Evolution of structures of the Urals, Kazakhstan, Tien Shan and Altai-Sayan region within the Ural-Mongolian Fold Belt (Paleo-Asian ocean). *Russian Geology and Geophysics*, 44(1–2): 5–27. EDN: PARCBJ
6. Buslov M.M. **2011**. Tectonics and geodynamics of the Central Asian Foldbelt: the role of Late Paleozoic large-amplitude strike-slip faults. *Russian Geology and Geophysics*, 52(1): 52–71. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.12.005>
7. Nurmagambetov A., Sadykov A., Timush A.V., Khaidarov M.S., Vlasova A.A., Mikhailova N.N., Sabitov M.M., Umirzakova A., Gapich V.A. **1996**. [The Zaisan earthquake of June 14, 1990]. In: *Earthquakes in the USSR in 1990*. Moscow: GS RAS, p. 53–59. (In Russ.).
8. Yemanov A.F., Yemanov A.A., Fateev A.V., Soloviev V.M., Shevkunova E.V., Gladyshev E.A., Antonov I.A., Korabelshchikov D.G., Podkorytova V.G., Yankaitis V.V. et al. **2021**. Seismological studies in the Altai-Sayan mountain region. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal = Russian Journal of Seismology*, 3(2): 20–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.02>
9. Leskova E.V., Yemanov A.A. **2006**. Deformation pattern for the epicentral area of the Chuya earthquake (September 27, 2003, K = 17, Gorny Altai) according to analysis data for aftershock focal mechanisms. *Physical mesomechanics*, 9(1): 51–55. (In Russ.). EDN: IJ-GIRL
10. Melnikova V.I., Gileva N.A., Radziminovich Ya.B., Seredkina A.I. **2010**. The Kultuk earthquake of August 27, 2008. In: *Earthquakes in Russia in 2008*, p. 120. (In Russ.).

11. Yemanov A.F., Yemanov A.A., Leskova E.V., Seleznev V.S., Fateev A.V. **2014**. The Tuva earthquakes of December 27, 2011, $M_L = 6.7$, and February 26, 2012, $M_L = 6.8$, and their aftershocks. *Doklady Earth Sciences*, 456(1): 594–597. <https://doi.org/10.1134/s1028334x14050249>
12. Yemanov A.F., Yemanov A.A., Fateev A.V., Leskova E.V., Shevkunova E.V., Podkorytova V.G. **2014**. Technogenic seismicity of the Kuzbass coal mines (Bachat earthquakes in 2012–2013). In: *Earthquakes in Russia in 2012*. Obninsk: GS RAS, p. 104–108. (In Russ.).
13. Yemanov A.F., Yemanov A.A., Fateev A.V., Leskova E.V., Shevkunova E.V., Podkorytova V.G. **2014**. Mining-induced seismicity at open pit mines in Kuzbass (Bachatsky earthquake on June 18, 2013). *Journal of Mining Science*, 50(2): 224–228.
14. Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Budkov A.M., Ivanchenko G.N. **2019**. On the genesis of the 2013 Bachat earthquake. *Geodynamics & Tectonophysics*, 10(3): 741–759. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0439>; EDN: CHOELE
15. Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G. **2017**. The active faults of Eurasia database. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 711–736. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0314>; EDN: ZWRGN
16. Goldin S.V., Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G. **2005**. Fields of the Earth's surface displacement in the Chuya earthquake zone in Gornyi Altai. *Doklady Earth Sciences*, 405A(9): 1408–1413. EDN: LJKWIT
17. Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Kale E., Duchkov A.D., Zapreeva E.A., Kazantsev S.A., Rusbek F., Bryuniks K. **2006**. Displacement fields and models of current motion in Gornyi Altai. *Russian Geology and Geophysics*, 47(8): 915–929. EDN: TQNFQZ
18. Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Solov'ev V.M., Shibayev S.V., Petrov A.F., Gornov P.Yu., Shestakov N.V., Boiko E.V., Timofeev Yu.A. **2012**. Plate boundaries in the Far East region of Russia (from GPS measurement, seismic-prospecting, and seismological data). *Russian Geology and Geophysics*, 53(4): 376–391. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.03.002>
19. Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Boyko E.V., Gribanova E.I., Semibalamut V.M., Timofeev A.V., Yaroshevich A.V. **2012**. Strain and displacement rates during a large earthquake in the South Baikal region. *Russian Geology and Geophysics*, 53(8): 798–816. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.06.007>
20. Calais E., Vergnolle M., Deverchere J., San'kov V., Lukhnev A., Amariargal S. **2002**. Are post-seismic effects of the $M = 8.4$ Bolnay earthquake (1905 July 23) still influencing GPS velocities in the Mongolia-Baikal area? *Geophysical Journal International*, 149(1): 157–168. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2002.01624.x>
21. Calais E., Vergnolle M., San'kov V., Lukhnev A., Miroshnitchenko A., Amarjargal S., Derverche're J. **2003**. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002): Implications for current kinematics of Asia. *Journal Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B10). <https://doi.org/10.1029/2002jb002373>
22. Jin Sh., Park P.-H., Zhu W. **2007**. Micro-plate tectonics and kinematics in Northeast Asia inferred from a dense set of GPS observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 257(3–4): 486–496. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.03.011>
23. Novikov I.S., Emanov A.A., Leskova E.V., Batalov V. Yu., Rybin A.K., Bataleva E.A. **2008**. The system of neotectonic faults in Southeastern Altai: orientations and geometry of motion. *Russian Geology and Geophysics*, 49(11): 859–867. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.04.005>
24. Leskova E.V., Emanov A.A. **2013**. Hierarchical properties of the tectonic stress field in the source region of the 2003 Chuya earthquake. *Russian Geology and Geophysics*, 54(1): 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.12.008>
25. Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Marinin A.V. **2013**. Stress state and deformations of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region. *Russian Geology and Geophysics*, 54(2): 206–222. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.01.011>
26. Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Timofeev A.V., Boyko E.V., Lunev B.V. **2014**. Block displacement fields in the Altai-Sayan region and effective rheologic parameters of the Earth's crust. *Russian Geology and Geophysics*, 55(3): 376–389. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.01.019>
27. Rogozhin E.A., Platonova S.G. **2002**. [Focal zones of strong earthquakes in Gornyi Altai in the Holocene]. Moscow: OIFZ RAN, 130 p. (In Russ.).
28. [Earthquakes and the basics of seismic zoning of Mongolia] (Eds V.P. Solonenko, N.A. Florensov). **1985**. Moscow: Nauka, 224 p. (In Russ.).
29. Khilko S.D., Florensov N.A., Kurushin R.A. et al. **1978**. [Seismotectonic lineaments and paleoseismodislocations of the Mongolian Altai]. In: *Seismotectonics of the southern regions of the USSR*. Moscow: Nauka, p. 75–88. (In Russ.).
30. Solonenko V.P. **1973**. Paleoseismology. *Izv. AN SSSR, Physics of the Solid Earth*, 9: 3–16. (In Russ.).
31. Zhalkovsky N.D., Kuchay O.A., Muchnaya V.I. **1995**. Seismicity and some characteristics of the stressed state of the Earth's crust in the Altai-Sayan region. *Geologiya i Geofizika*, 36(10): 20–30. (In Russ.).
32. Rebetsky Yu.L. **2008**. [Current state of earthquake prediction theory. Estimation results of natural stresses and new earthquake source model]. In: *Problemy tektonofiziki: K sorokaletiyu sozdaniya M.V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN*. Moscow: IFZ RAN, p. 359–395. (In Russ.).
33. Panteleev I.A., Naimark O.B. **2014**. Modern trends in mechanics of tectonic earthquakes. *Perm Federal Research Center J.*, 3: 44–62. (In Russ.). EDN: TDURFP
34. Goldin S.V., Dyadkov P.G., Dashevsky Yu.A. **2001**. The South Baikal geodynamic testing ground: strategy of earthquake prediction. *Geologiya i Geofizika*, 42(10): 1484–1496. (In Russ.).

35. Yunga S.L. **1990**. [Methods and results of studying seismotectonic deformations]. Moscow: Nauka, 191 p. (In Russ.).
36. Riznichenko Yu.V. **1985**. [Problems of seismology. Selected works]. Moscow: Nauka, 408 p. (In Russ.).
37. Rebetsky Yu.L. **1997**. Reconstruction of tectonic stresses and seismotectonic strains: Methodical fundamentals, current stress field of Southeastern Asia and Oceania. *Doklady Earth Sciences*, 354(4): 560–563.
38. Rebetsky Yu.L. **2007**. *Tectonic stresses and strength of rock massifs*. M.: Akademkniga, 406 p. (In Russ.).
39. Lukk A.A., Yunga S.L. **1979**. Seismotectonic deformation of the Garm region. *Izv. AN SSSR, Fizika Zemli*, 10: 24–43. (In Russ.).
40. Lukk A.A., Shevchenko V.I., Leonova V.G. **2015**. Autonomous geodynamics of the Pamir–Tien Shan junction zone from seismology data. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 51(6): 859–877. <https://doi.org/10.1134/s1069351315040060>
41. Sycheva N.A., Mansurov A.N. **2017**. Comparison of crustal deformation rates estimated from seismic and GPS data on the Bishkek geodynamic polygon. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 809–825. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0318>; EDN: ZWRGOZ
42. Lukk A.A., Shevchenko V.I. **2019**. Seismicity, tectonics, and GPS geodynamics of the Caucasus. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 55(4): 626–648. <https://doi.org/10.1134/s1069351319040062>
43. Yunga S.L. **2002**. *Study of surface movements and deformations of the earth's crust on the territory of the Central Tien Shan, the Kazakh platform and Altai; creation of seismological data processing programs, processing*: Research report. Obninsk, 41 p. (In Russ.).
44. Yunga S.L. **1997**. On the classification of seismic moment tensors based on their isometric mapping onto a sphere. *Doklady Akademii Nauk*, 352(2): 253–255. (In Russ.).
45. Gushchenko O.I. **1975**. Kinematic principle of reconstruction of directions of major stresses (from geological and seismological data). *Doklady AN SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 225(3): 557–560. (In Russ.).
46. Yunga S.L. **1979**. On the deformation mechanism of a seismically active crustal volume. *Izv. AN SSSR, Fizika Zemli*, 10: 14–23. (In Russ.).
47. Khristianovich S.A., Shemyakin E.I. **1969**. [On the plane strain of plastic material under complex loading]. *Izv. AN SSSR. Mechanics of Solids*, 5: 138–149. (In Russ.).
48. Filin A.P. **1975**. [Applied mechanics of solid deformable body]. Vol. 1. Moscow: Nauka, 832 p. (In Russ.).
49. Sokolovsky V.V. **1969**. *Theory of plasticity*. Moscow: Vysshaya shkola, 608 p. (In Russ.).
50. Sycheva N.A., Sychev V.N. **2022**. Some characteristics of the seismicity of Altai and Sayan. In: *Materials of the XIV school-conference with international participation "Problems of Geocosmos 2022"*, Saint Petersburg, October 3–7, 2022. St. Petersburg: Skifia-print, p. 84–92. (In Russ.).
51. Yemanov A.F., Yemanov A.A., Leskova E.V., Kolesnikov Yu.I., Yankaitis V.V., Filina A.G. **2012**. The Ms = 7.0 Uureg Nuur earthquake of 15.05.1970 (Mongolian Altai): the aftershock process and current seismicity in the epicentral area. *Russian Geology and Geophysics*, 53(10): 1090–1099. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.08.009>
52. Kuchai O.A. **2012**. Specific features of fields of stresses associated with aftershock processes in the Altai-Sayan mountainous region. *Geodynamics & Tectonophysics*, 3(1): 59–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2012-3-1-0062>
53. Radziminovich N.A. **2021**. Focal mechanisms of earthquakes of Southern Baikal Region and Northern Mongolia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 12(4): 902–908. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2021-12-4-0562>
54. Jeffreys H., Bullen K.E. **1940**. *Seismological tables*. London: British Association for the Advancement of Science.
55. Goldin S.V. **2004**. Dilatancy, repacking, and earthquakes. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 40(10): 817–832.
56. Leskova E.V., Emanov A.A. **2014**. Some properties of the hierarchical model reproducing the stress state of the epicentral area of the 2003 Chuya earthquake. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 50(3): 393–402.
57. Sadovskiy M.A., Pisarenko V.F. **1991**. [Seismic process in the block medium]. Moscow: Nauka, 96 p. (In Russ.).
58. Goldin S.V., Dyad'kov P.G., Dashevskiy Yu.A. **2001**. The South Baikal geodynamic testing ground: Strategy of earthquake prediction. *Russian Geology and Geophysics*, 42(10): 1484–1496. (In Russ.).
59. Rebetskiy Yu.L. **2008**. [Current state of earthquake prediction theory. Estimation results of natural stresses and new earthquake source model]. In: *Problemy tektonofiziki: K sorokaletiyu sozdaniya M.V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN*. Moscow: IFZ RAN, p. 359–395. (In Russ.).

Об авторе

Сычева Найля Абдуллоевна (<https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, ivtran@mail.ru

About the Author

Sycheva, Naylya A. (<https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>), Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, ivtran@mail.ru

Поступила 26.07.2023

Принята к публикации 18.08.2023

Received 26 July 2023

Accepted 18 August 2023

© Авторы 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 553.98

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.243-263>
<https://www.elibrary.ru/eeerziz>

«Палеозойская» нефть Урманского месторождения (юго-восток Западной Сибири)

М. Ф. Крутенко^{@1}, В. И. Исаев¹, Г. Лобова²

@ E-mail: margaritagalieva@gmail.com

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

²Независимый эксперт, Висагинас, Литва

Резюме. В работе представлены результаты применения палеотемпературного моделирования для определения вероятных источников, формирующих залежи углеводородов в доюрском фундаменте на юго-востоке Западной Сибири. Открытие залежей легкой нефти на глубинах свыше 7000 м в Таримском бассейне (КНР) свидетельствует о возможности существования благоприятного температурного режима для генерации и сохранения залежей углеводородов даже на столь больших глубинах. По некоторым оценкам, в глубоководных резервуарах содержится около 40 % доказанных мировых запасов нефти и газа. С палеозойскими осадочными бассейнами Западно-Сибирской плиты, формирующимися на срединных массивах, где на протяжении длительного геологического времени сохраняются благоприятные условия для накопления и преобразования рассеянного органического вещества в углеводороды, российские ученые также связывают большие перспективы. Существуют две концепции «главного источника» нефти, заполняющей палеозойские резервуары. Первая предполагает формирование залежи за счет восходящей миграции, вторая – за счет нисходящей межпластовой миграции углеводородов из юрских источников генерации. В настоящем исследовании ставится цель – определить вероятные источники «палеозойских» залежей углеводородов на Урманском месторождении методом моделирования термической истории фанерозойских потенциально нефтематеринских свит. Ранее авторы провели подобное исследование на Останинской группе месторождений. Исследования продолжены на Чузикско-Чижанской группе месторождений, приуроченной к одноименной тектонической структуре. Обе группы принадлежат к Нюрольскому осадочному бассейну. Установлено, что палеозойский резервуар на Урманском месторождении аккумулирует частично сохранившийся газ, источником которого являются палеозойские нефтематеринские свиты, и нефть, представляющую собой смесь юрской нефти морского и континентального генезисов.

Ключевые слова: генезис «палеозойских» залежей углеводородов, моделирование термической истории, фанерозойские потенциально нефтематеринские свиты, Урманское месторождение, юго-восток Западной Сибири

The Paleozoic oil in the Urman field (the southeast of Western Siberia)

Margarita F. Krutenko^{@1}, Valery I. Isaev¹, Galina Lobova²

@ E-mail: margaritagalieva@gmail.com

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

²Independent expert, Visaginas, Lithuania

Abstract. This paper presents the results of applying paleotemperature modelling for determination possible sources, which form hydrocarbon deposits in the pre-Jurassic basement in the southeast of Western Siberia. Discovery of light oil deposits below the depth of 7000 m in the Tarim basin indicates the possibility of existence favourable temperature regime for generation and conservation of hydrocarbon deposits even at such great depths. According to some estimates about 40 % of the total proved oil and gas reserves in the world are distributed in the superdeep strata. Russian scientists also have extensive prospects for the Paleozoic sedimentary basins of Western Siberian Plate. These basins formed on betwixt mountains, where favourable environment for accumulation of dispersed organic matter and its transformation into hydrocarbons persisted for a long geological time. There are two concepts of “the main source” for oil accumulated in the Paleozoic reservoirs. The first suggests deposit formation via upward migration, while the second supports the

idea of downward interstratal migration of hydrocarbons from the Jurassic source rocks. The aim of this study is to determine possible sources for the Paleozoic hydrocarbon deposits in the Urman field via modelling of thermal history of the Phanerozoic oil-source rocks. The first experience of performing such research is related to the Ostanino group of fields. The research is continued for the Chuzic-Chizhapka group of fields, which is located on the tectonic unit of the same name. Both groups are associated with the Nyurol sedimentary basin. It was found that the Paleozoic reservoir of the Urman field accumulates partially preserved gas generated by the Paleozoic source-rocks and oil representing a mixture of the Jurassic oil of marine and terrigenous origin.

Keywords: origin of the Paleozoic hydrocarbon deposits, modelling of thermal history, the Phanerozoic oil-source rocks, the Urman field, southeast of Western Siberia

Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность Валерию Ивановичу Исаеву (посмертно) за многолетнее руководство группой томских геотермиков и благодарят Ольгу Степановну Исаеву, руководителя Томского филиала Федерального бюджетного учреждения «Территориального фонда геологической информации по Сибирскому федеральному округу» за предоставленный фактический материал.

Для цитирования: Крутенко М.Ф., Исаев В.И., Лобова Г. «Палеозойская» нефть Урманского месторождения (юго-восток Западной Сибири). *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 3, с. 243–263. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.243-263>; <https://www.elibrary.ru/eeerzis>

Acknowledgements

The authors greatly appreciate Valery Ivanovich Isaev (posthumously) for many years of guidance of Tomsk geothermic group and thank Olga Stepanovna Isaeva, the director of Tomsk branch of the Federal Budgetary Institution “Territorial fund of geological information in Siberian Federal District”, for providing factual data.

For citation: Krutenko M.F., Isaev V.I., Lobova G. The Paleozoic oil in the Urman field (the southeast of Western Siberia). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 243–263. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.243-263>; <https://www.elibrary.ru/eeerzis>

Введение

Вопрос о воспроизводстве запасов углеводородов (УВ) за счет глубокозалегающих резервуаров, возникший еще в прошлом столетии, актуален и по сей день. Потенциальные перспективы восполнения ресурсной базы углеводородного сырья на юго-востоке Западной Сибири связывают с открытием месторождений в породах доюрского фундамента, и это не случайно. Наличие углеводородов, связанных с протерозойско-палеозойским стратиграфическим уровнем, доказано открытием крупных месторождений в восьми нефтегазоносных провинциях мира, как в пределах России (Волго-Уральская, Тимано-Печорская [1], Восточно-Сибирская), так и в известных бассейнах Китая (Таримский, Ордосский и Сычуаньский), Северной Америки (Пермский, Уиллистонский и Мичиганский), Ближнего Востока (Оманский) [2]. По оценкам [3], около 40 % доказанных мировых запасов нефти и газа сосредоточены в сверхглубоких пластах. Открытие в 2016 г. залежей легкой нефти на сверхбольших глубинах (7000–8500 м) в Таримском бассейне на крупном нефтегазовом месторождении Шунбэй [3] свидетельствует о возможности существования благоприятного темпе-

ратурного режима для генерации и сохранности залежей углеводородов даже на столь больших глубинах. Здесь из скважины Лунтан 1 ведется добыча нефти из кембрийского пласта Усонггер (интервал 8203–8260 м) [4]. Предполагается, что кембрийские коллекторы в Таримском бассейне занимают площадь примерно 20 000 км², при этом ресурсы нефти могут достигать более 1 млрд т [4].

С палеозоем юго-восточной части Западно-Сибирской плиты наши ученые также связывают большие перспективы нефтегазоносности [5–7 и др.]. Основной интерес вызывают палеозойские осадочные бассейны, формирующиеся на срединных массивах, где в силу общего устойчивого погружения на протяжении длительного геологического времени сохраняются благоприятные условия для накопления рассеянного органического вещества и преобразования его в углеводороды [8]. В пределах Межовского срединного массива сформировался Ньюрольский осадочный бассейн, перспективность которого с точки зрения тектонического строения подтверждается большим количеством открытых на данной территории залежей в палеозойском нефтегазоносном комплексе (НГК), полученными притоками нефти и газа, многочисленными газо- и нефтепрояв-

лениями. Однако проблему генезиса месторождений углеводородов в палеозойском НГК Западной Сибири нельзя считать решенной. Дискуссия ведется о «главном источнике» нефти, заполняющей палеозойские резервуары.

Предложены две концепции. Согласно первой, палеозойские отложения имеют свой самостоятельный нефтегенерационный потенциал, а залежи УВ образуются путем восходящей миграции [9]. Согласно второй концепции, основанной на корреляции нефтей палеозойских залежей и битумоидов юрских материнских пород, залежи УВ в палеозойском НГК сформированы нисходящей межпластовой миграцией УВ из юрских источников генерации [10].

Ранее мы выполнили подобное исследование на Останинской группе месторождений

(Томская область) [11]. Для продолжения исследования была выбрана Чузиско-Чижапская группа месторождений (рис. 1), принадлежащая одноименной тектонической структуре. Обе группы приурочены к Нюрольскому осадочному бассейну [12].

В настоящем исследовании ставится цель – определить вероятные источники «палеозойских» залежей нефти и газа на Урманском месторождении методом моделирования термической истории фанерозойских потенциально нефтематеринских свит и дать оценку их роли в формировании этих залежей.

Методика и объект исследований

Методика исследований базируется на применении хорошо апробированного метода

палеотемпературного моделирования [13], основанного на численном решении уравнения теплопроводности горизонтально-слоистого твердого тела с подвижной верхней границей. В качестве краевого условия в математическую модель включен «местный» климатический вековой ход температур на земной поверхности (рис. 2), начиная с позднего ордовика (449.1–0 млн л.н.). В роли фактических измерений для построения моделей выступают температуры, полученные при испытаниях скважин, а также палеотемпературы из определений отражательной способности витринита (ОСВ).

С раннемелового времени (120–0 млн л.н.) «местный» вековой ход для юго-востока Западной Сибири построен на основе обобщения экспериментальных определений и палеоклиматических реконструкций [14].

С позднеордовикского до раннемелового (449.1–

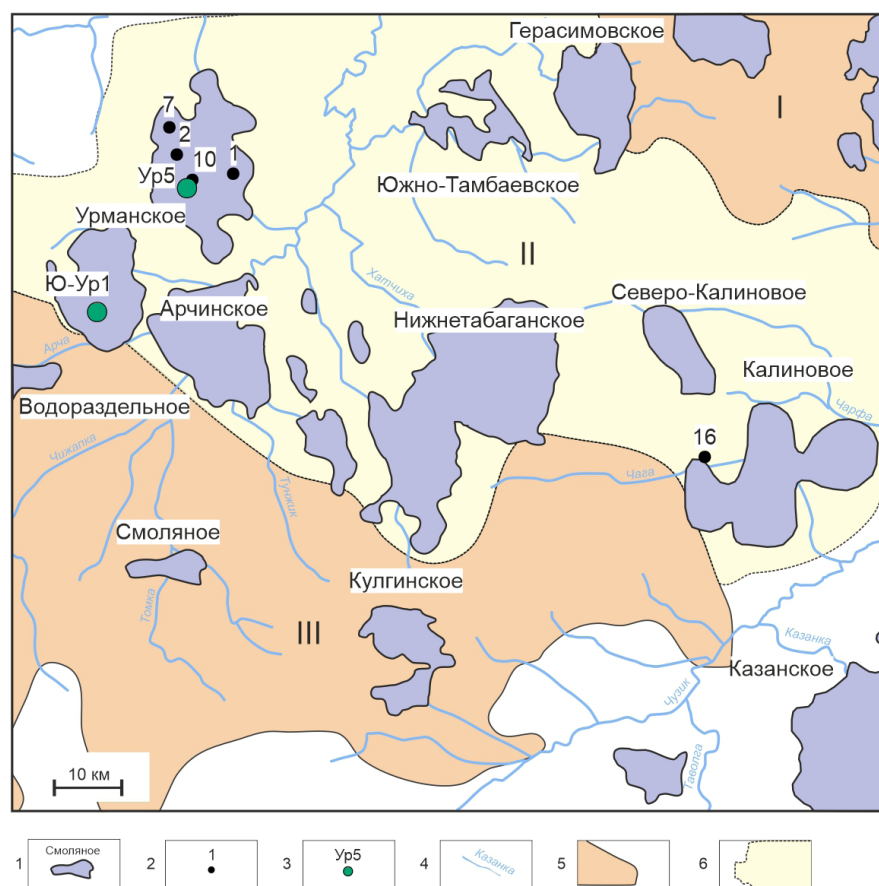


Рис. 1. Обзорная карта территории исследования: 1 – местоорождение УВ; 2 – глубокая скважина; 3 – скважина, для которой выполнялось палеотемпературное моделирование; 4 – речная сеть; 5 – положительные структуры II порядка (по [12]): I – Пудинское мезоподнятие, III – Лавровский мезовыступ; 6 – промежуточные структуры II порядка: II – Чузиско-Чижапская мезоседловина.

Fig. 1. The overview map of the research territory: 1 – a hydrocarbon field; 2 – a deep well; 3 – a well, for which paleotemperature modelling was performed; 4 – river system; 5 – positive second-order tectonic units (according to [12]): I – Pudin mesoplift, III – Lavrov mesoarch; 6 – transitional tectonic unit of the II order: II – Chuzisko-Chizhapka mesodepression.



Рис. 2. Верхнее граничное условие параметрической модели – вековой ход температур земной поверхности на юго-востоке Западной Сибири.

Fig. 2. The upper boundary condition in parametric model – secular trend in temperatures of the Earth's surface in the southeast of Western Siberia.

120 млн л.н.) «местный» вековой ход температур на поверхности Земли дополняется палеоклиматическими реконструкциями [15], основанными на совмещении анализов литологических и палеонтологических индикаторов климата и изотопного анализа кислорода.

Этапы моделирования, входные параметры модели и выходные данные представлены в виде блок-схемы и подробно описаны в работе [11]. Реконструкция производится на основании принятой региональной стратиграфической схемы палеозойских образований для Нюрольского структурно-фациального района [16].

Динамика теплового потока во времени связана с тектоническим развитием территории исследования. Доюрский этап развития территории характеризуется накоплением осадков и рифтогенезом в позднегерцинское время, вызванным действовавшим мантийным суперплюмом.

Начиная с ордовика–силура на территории начинает накапливаться осадочный чехол. Осадконакопление продолжается вплоть до каменноугольного периода с небольшим перерывом в эйфеле. Экспериментальные данные о палеотермометрах, характеризующих температуры осадочного чехла в период до активизации

мантийного плюма, получить невозможно ввиду того, что все органические и минеральные показатели палеотемператур характеризуют только максимальные температуры, т.е. температуры эпохи активизации плюма [17]. Поэтому принято, что тепловой поток для этого времени (позднеордовикский – среднекаменноугольный периоды, 450–313.2 млн л.н.) превосходит современный тепловой поток из основания осадочного разреза в 2 раза. Этот этап характеризуется постоянным тепловым потоком.

Тепловой поток в периоды становления и угасания мантийного плюма описан с помощью математической функции, обладающей максимальной скоростью увеличения / уменьшения значения, – уравнением четверти окружности (рис. 3).

Данная модель, в отличие от используемой нами ранее [11], значительно доработана. Основные отличия ее от предыдущей заключаются в том, что, во-первых, учитывается активность Сибирского суперплюма, который вызвал значительное увеличение теплового потока на рубеже перми и триаса (заявшего 1–2 млн лет в период 249–251 млн л.н. [18] или, по другим данным, 250–252 млн л.н. [19, 20]). Уровень возрастания теплового потока

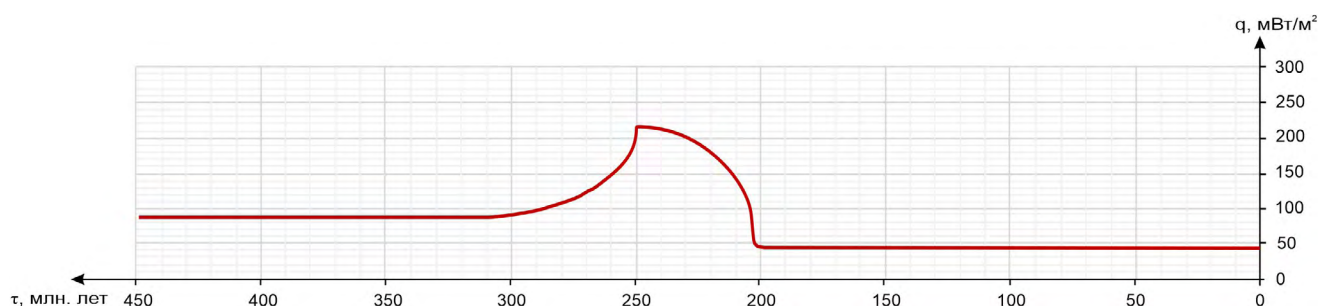


Рис. 3. Динамика теплового потока во времени (на примере скважины Южно-Урманская 1).

Fig. 3. Deep heat flow dynamics in time (by the example of the Yuzhno-Urman 1 well).

был определен методом подбора по ОСВ в доюрских отложениях. Во-вторых, принято, что максимум температур в осадочном разрезе по времени может быть связан именно с действовавшим мантийным плюмом, т.е. привязан к конкретному геологическому событию. И в-третьих, принято допущение о том, что тепловой поток позднего ордовика – среднего карбона превышает современный всего в 2 раза [17]. В ранней модели для характеристики этого времени использовалась величина теплового потока, соответствующая максимуму теплового потока ($200\text{--}300\text{ мВт/м}^2$), рассчитанному по определениям ОСВ в доюрских отложениях [11]. Известно, что плотность современных тепловых потоков редко превосходит 150 мВт/м^2 . Потоки более 100 мВт/м^2 характерны для зон современного вулканизма. Поэтому сложно допустить существование столь высоких тепловых потоков в период спокойного режима осадконакопления без масштабной вулканической активности. Представляется, что обновленные характеристики теплового потока более тесно связаны с геологическим строением изучаемой территории, поэтому их использование предпочтительно.

Объектом исследований выбрано одно из месторождений Чузикско-Чижапской группы, административно приуроченное к Парабельскому району Томской области (рис. 1). В геологическом строении описываемой территории принимают участие структуры платформенного чехла. Доюрский фундамент представлен отложениями силура, девона, реже карбона и перми. Толщина осадочного чехла изменяется от 2803 м (Калиновое месторождение) до 3250 м (Урманское месторождение). Мощность коры выветривания на территории изменяется от 0 до 208 м (Нижнетабаганское месторождение). Мощность вскрытых доюрских отложений до 1483 м (Калиновое 16).

Чузикско-Чижапская группа месторождений характеризуется очень высокой концентрацией месторождений в доюрском нефтегазоносном комплексе (среди них Урманское, Арчинское, Нижнетабаганское, Калиновое, Северо-Калиновое, Южно-Тамбаевское, Южно-Табаганское месторождения). При этом геологические условия Чузикско-Чижапской группы значительно отличаются от таковых

Останинской группы, на которых наблюдается значительно усеченный разрез юрской толщи, в частности отсутствует нижнеюрская тогурская свита. На территории Чузикско-Чижапской группы накапливались палеозойские отложения рифогенного типа с постепенным переходом к депрессионному в восточном направлении. Кроме того, территория характеризуется широким разбросом возрастов вскрытых в кровле палеозоя отложений – от силурийских до раннепермских.

Таким образом, выбор в качестве территории исследования Чузикско-Чижапской группы обусловлен ее высоким нефтегазоносным потенциалом и широким разнообразием геологических условий. Включение территории данной группы в исследование возможных источников генерации углеводородов, заполняющих ловушки в доюрском комплексе, позволит дополнить результаты по Останинской группе и с учетом изучения различных геологических обстановок сделать их более комплексными.

Выбор пал на **Урманское месторождение**, которое находится в пределах Чузикско-Чижапской мезоседловины в центральной части Нюрольского погруженного блока Межевского срединного массива. Покров погруженного блока представлен карбонатными, терригенно-карбонатными и терригенными толщами от силурийского до раннедевонского возраста значительной мощности. В пределах Урманского месторождения породы палеозоя моноклинально погружаются в западном направлении, углы падения изменяются от 5 до 25° .

Урманская структура осложнена двумя локальными поднятиями – собственно Урманским и Южно-Урманским, расположенным в юго-западной части поднятия. Породы фундамента, коры выветривания и нижнеюрские отложения рассечены многочисленными проникающими малоамплитудными разрывными нарушениями, с субвертикальными поверхностями сместителей. Несмотря на то что в рассматриваемом районе переработка палеозойских пород герцинскими движениями не слишком велика, здесь широко развиты разломы северо-западного простирания. Фундамент территории месторождения имеет покровно-складчатое строение. Покровно-складчатые сооружения были окончательно

консолидированы в герцинское (позднепалеозойское) время, а в раннем триасе нарушены рифтогенными процессами, в результате которых сформировались грабенообразные структуры, выполненные в основном магматическими породами основного и среднего состава.

Основная залежь сконцентрирована в пределах Урманского локального поднятия. По эрозионной поверхности палеозоя (отражающий горизонт M_1) Урманское поднятие ограничено изогипсами $(-2990)–3010$ м, имеет амплитуду около 100 м и размеры 8×12 км и осложнено Северным куполом и Центральной слабо дифференцированной приподнятой зоной. Наивысшими отметками характеризуется Северный купол, который замыкается изогипсой -2920 м и имеет амплитуду 40 м.

Промышленная нефтегазоносность Урманского месторождения связана с залежами в кавернозно-трещиноватых карбонатах коренных пород палеозоя (горизонт M_1), с отложениями коры выветривания (горизонт M), а также с терригенными коллекторами пластов салатской и тюменской свит юрской системы.

В отложениях палеозоя (пласты $M+M_1$) выделено 4 залежи углеводородов – одна нефтегазоконденсатная (в Центральном куполе) и три нефтяные, в том числе две залежи нефти в Южно-Урманском куполе в районе скважин № 1 и 29ПО. Центральная залежь нефтегазоконденсатная, тектонически экранированная, сложнопостроенная за счет блокового строения, с высокой литологической неоднородностью. Размеры залежи 11.0×5.0 км, высота достигает 100 м, размеры газовой шапки 7.0×1.9 км, высота 47 м, средняя эффективная нефтенасыщенная толщина 10.6 м, газонасыщенная толщина 5 м. Эта залежь вскрыта скважиной Урманская 5.

Залежь в Южно-Урманском куполе в районе скважины 1 имеет вытянутую форму, размеры $6.8 \times (0.6–2.6)$ км, высота 70 м, средняя эффективная нефтенасыщенная толщина 3.5 м. Результаты испытаний скважин Урманского месторождения приведены в табл. 1.

Выбор скважины Урманская 5 для выполнения целевого палеотемпературного моделирования обусловлен уникальным сочетанием тепловых параметров и характеристик геологического разреза. Скважина Урманская 5 вскрыла тогурскую свиту, являющуюся нефте-

материнской для нижнеюрского и, возможно, доюрского НГК. В этой скважине вскрыты отложения позднего девона рифогенного типа, не перекрытые корой выветривания.

Величина современного теплового потока из основания палеозойского разреза составляет 42 мВт/м². Значение температуры, определенной по ОСВ в доюрских отложениях, -163 °С. Кроме того, в скважине получены притоки нефти и газа из испытанного интервала внутреннего палеозоя.

Стратиграфическая принадлежность и мощность отложений, слагающих осадочный разрез скважины Урманская 5, приняты в соответствии с литолого-стратиграфической разбивкой скважины (материалы ТФ ТФГИ СФО). Разбивка дополнена реконструкцией стратиграфического разреза (табл. 2), включая девонско-силурийские отложения, не вскрытые скважиной (по [16]). Возраст отложений, вскрытых в кровле палеозоя, – позднедевонский (по материалам отчетов ТФ ТФГИ СФО).

В разрезе в районе скважины Урманская 5, выполненном рифогенными образованиями, присутствуют три перерыва в осадконакоплении. Первый, непродолжительный по времени, соответствует первой половине эйфельского века. Второй, длительностью 36.6 млн лет, начался в среднекаменноугольном отделе. Он соответствует завершающей тектонической фазе герцинской складчатости и сопровождается размывом каменноугольных отложений – елизаветинской C_{2elz} , средневасюганской C_{1-2sv} и части табаканской C_{1tb} свит. Далее на нижнекаменноугольных отложениях табаканской свиты в континентальных условиях начинает накапливаться омеличская свита пермского возраста. Во время третьего перерыва, начало которого совпадает с завершением активизации мантийного суперплюма, денудации подвергаются накопленные пермские, нижнекаменноугольные и частично верхнедевонские отложения (омеличская P_{1-2om} , табаканская C_{1tb} и частично лугинецкая D_3lg свиты). Девонские отложения перекрыты тогурской свитой нижнетогурского возраста.

При решении обратных задач геотермии как на первом, так и на втором шаге «невязка» расчетных и измеренных (наблюденных) геотемператур не превысила ± 2 °С (табл. 3, рис. 4), т.е. соответствует оптимальной.

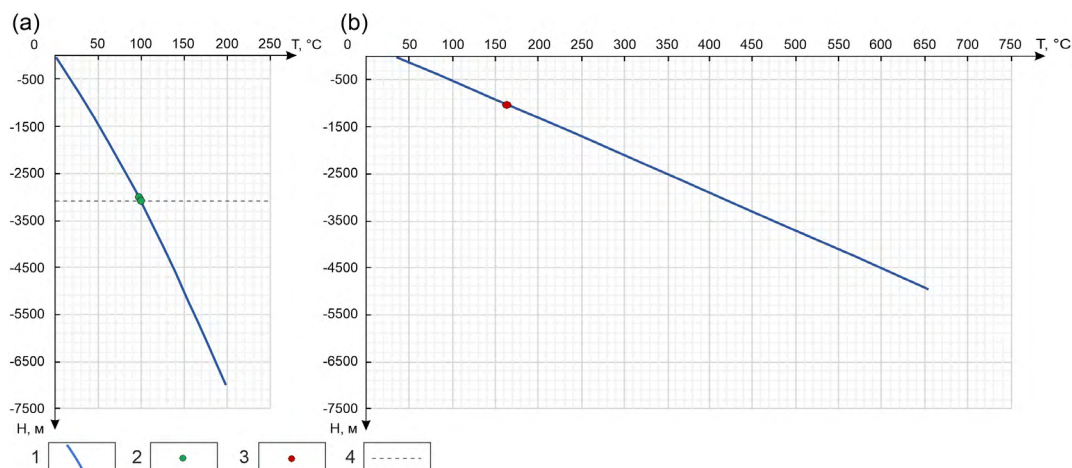


Рис. 4. Сопоставление расчетных и измеренных геотемператур в скважине Урманская 5 для современного разреза (а), на время палеозойского палеотемпературного максимума – 250 млн л.н. (b): 1–3 – геотемпературы (1 – расчетные; 2 – измеренные пластовые; 3 – определенные по ОСВ); 4 – положение подошвы осадочного чехла.

Fig. 4. Matching of modelled and experimental geotemperatures in the Uрман 5 well for present-day sequence (a), for sequence at the period of the Paleozoic paleotemperature maximum – 250 Ma ago (b): 1–3 – geotemperatures (1 – modelled; 2 – measured formation temperatures; 3 – measured by vitrinite reflectance); 4 – the bottom of the sedimentary cover.

Таблица 1. Результаты испытаний скважин на Урманском месторождении

Table 1. Well test results in the Uрман field

Свита (горизонт, пласт)	Интервал, м	Тип флюида	Дебит, м³/сут
<i>Урманская 1</i>			
Внутренний палеозой (M ₁)	3060–3105; 3060–3078; 3060–3073	Нефть, водонефтяная эмульсия	41.5
<i>Урманская 2</i>			
Васюганская свита (Ю ₁)	2628–2636	Пластовая вода	3.09
Тюменская свита (Ю ₃)	2827–2834	Пластовая вода	1.35
	3030–3048	Вода + водонефтяная эмульсия	0.67
Кора выветривания (М)	3088–3105	Нефть, пластовая вода	0.85; 16.05
<i>Урманская 5</i>			
Лугинецкая свита (D _{3lg})	3074–3082; 3074–3085 3086–3096; 3086–3089	Нефть, газ Нефть, пластовая вода, газ	0.5; 50 21.6; 122.4; 2000
<i>Урманская 7</i>			
Кора выветривания (М) + внутренний палеозой (M ₁)	3083–3089	Нефть, пластовая вода	20.7; 183.3
Внутренний палеозой (M ₁)	3115–3119	Вода с пленкой нефти	11.2
<i>Урманская 10</i>			
Внутренний палеозой (M ₁)	3075–3081	Нефть	25
	3075–3081; 3083–3087	Нефть	36
	3075–3081; 3089–3092	Нефть	28.8
	3109–3116; 3109–3120	«Сухо»	–
<i>Южно-Урманская 1</i>			
Тюменская свита (J _{2tm}) + армичевская свита (D _{1rm})	3128–3148; 3154–3203	Нефть	0.38
Армичевская свита (D _{1rm})	3154–3203	Нефть, газопроявления	0.18; незначит.
<i>Южно-Урманская 3</i>			
Васюганская свита	2689.5–2748	Фильтрат	1.2 м³ за 45 мин
Внутренний палеозой (M ₁)	3198–3250; 3097–3170	«Сухо»	–

Примечание. Таблица составлена по материалам Томского филиала Территориального фонда геологической информации по Сибирскому федеральному округу (ТФ ТФГИ СФО).

Note. The table was compiled using data from Tomsk branch of “Territorial fund of geological information in Siberian Federal District”.

Таблица 2. Осадочный разрез скважины Урманская 5, выполненный на основании литолого-стратиграфической разбивки и реконструкции стратиграфического разреза**Table 2.** Sedimentary sequence in area of the Urman 5 well, which is composed by lithological and stratigraphic data and stratigraphic reconstruction

Индекс отложений (см. рис. 6)	Отложения Возраст	Время накопления			Мощность, м	Кровля свиты, м
		Начало, млн л.н.	Окончание, млн л.н.	Продолжительность, млн лет		
Kz	Четвертичные отложения Q	1.64	0	1.64	12	0
	Плиоценовые N ₂	4.71	1.64	3.07	1	12
	Миоценовые N ₁	24	4.71	19.29	5	13
	Некрасовская серия Pg ₃ nk Средний–верхний олигоцен	32.3	24	8.3	75	18
	Чеганская свита Pg ₂₋₃ hq Верхний эоцен – олигоцен	41.7	32.3	9.4	145	93
	Люлинворская свита Pg ₂ ll Эоцен	54.8	41.7	13.1	90	238
	Талицкая свита Pg ₁ tl Палеоцен	61.7	54.8	6.9	10	328
K	Ганькинская свита Pg ₁ –K ₂ gn Маастрихт–даний	73.2	61.7	11.5	115	338
	Славгородская свита K ₂ sl Верхний сантон – кампан	86.5	73.2	13.3	54	453
	Ипатовская свита K ₂ ip Коньяк – нижний сантон	89.8	86.5	3.3	159	507
	Кузнецовская свита K ₂ kz Турон	91.6	89.8	1.8	16	666
	Покурская свита K ₁₋₂ pk Верхний апт – альб – сеноман	114.1	91.6	22.5	882	682
	Алымская K ₁₋₂ a Апт	120.2	114.1	6.1	0	–
	Киялинская свита K ₁ kls Готерив–баррем	132.4	120.2	12.2	686	1564
	Тарская свита K ₁ tr Валанжин	136.1	132.4	3.7	75	2250
	Куломзинская свита K ₁ klm Берриас–валанжин	145.8	136.1	9.7	250	2325
J ₃ bg	Баженовская свита J ₃ bg Титон	151.2	145.8	5.4	25	2575
J ₃	Георгиевская свита J ₃ qr Киммеридж	156.6	151.2	5.4	0	–
	Наунакская свита J ₃ nn Келловей–оксфорд	162.9	156.6	6.3	89	2600
J ₂ tm	Тюменская свита J ₂ tm Байос–бат	170.3	162.9	7.4	281	2689
J ₁₋₂	Салатская свита J ₁₋₂ sl Нижний тоар – нижний байос	178.1	170.3	7.8	90	2970
J ₁ tg	Тогурская свита J ₁ tg Нижний тоар	182.7	178.1	4.6	22	3060
–	Размыв омеличской, части табаганской, части лугинецкой свит	252.2	182.7	69.5	–1014	–
P ₁₋₂	Омеличская толща P ₁₋₂ om	276.6	252.2	24.4	150	–
–	Размыв елизаровской, средневасюганской и части табаганской свит	313.2	276.6	36.6	–420	–

C ₁₋₂	Елизаровская свита C ₂ elz Башкирский век	320.2	313.2	7	120	–
	Средневазюганская свита C ₁₋₂ sv Верхний серпухов – башкирский век	326.2	320.2	6	200	–
	Табаганская свита C ₁ tb Турне – средний серпухов	358.9	326.2	32.7	464	–
D ₃ lg	Лугинецкая свита D ₃ lg Фран-фамен	382.7	358.9	23.8	1500*	3082
D ₁₋₂	Герасимовская свита D ₂ gs Верхний эйфель – живёт	390.5	382.7	7.8	1030	4082
	Перерыв (скрытое несогласие) Нижний эйфель	393.3	390.5	2.8	0	–
	Надеждинская свита D ₁ nd Верхний эмс	400.5	393.3	7.2	220	5112
	Солоновская свита D ₁ sl Нижний эмс	407.6	400.5	7.1	200	5332
	Армичевская свита D ₁ rm Прага	410.8	407.6	3.2	270	5532
D ₁ ks	Кыштовская свита D ₁ ks Лохков	419.2	410.8	8.4	400	5802
S ₂	Межовская свита S ₂ mv Лудлов–прижидол	427.4	419.2	8.2	360	6202
S ₁ lr	Ларинская свита S ₁ lr Лландовери–венлок	443.4	427.4	16	450	6562

*Показана мощность лугинецкой свиты, которая частично размыта (размытая мощность в модели 500 м) и частично вскрыта бурением (вскрытая мощность составляет 218 м).

*Thickness of Luginetsk formation, which is partially eroded (eroded thickness in model is 500 m) and partially exposed by drilling (exposed thickness is 218 m).

Примечания. 1. Глубина реконструированного разреза 7012 м. 2. Фактический забой скважины 3300 м. 3. Серой заливкой выделены строки, показывающие размыв отложений и перерыв осадконакопления среднедевонских отложений; розовой – строки с потенциально нефтематеринскими свитами; зеленой – мощности отложений, вскрытых бурением, желтой – реконструированные мощности отложений.

Notes. 1. Depth of reconstructed well section is 7012 m. 2. Real well depth is 3300 m. 3. Rows, which contain periods of denudation and break in the Middle Devonian, are highlighted in grey, which contain oil-source rocks, are highlighted in pink. Thicknesses of formations which are exposed by drilling, are highlighted in green and reconstructed thicknesses of formations are highlighted in yellow.

Таблица 3. Скважина Урманская 5. Измеренные и расчетные температуры, рассчитанный тепловой поток

Table 3. The Urman 5 well. Experimental and modelled temperatures, calculated deep heat flow

Приуроченность / глубина, м	Температура, °C				Тепловой поток, мВт/м ² . Динамическая характеристика (глубина палеозойского осадочного разреза)
	Пластовая измеренная	По ОСВ (R_{vt}^0)	Модельная (расчетная)	Разница расчетной и измеренной	
J ₁₋₂ sl / 3044	99	–	98	–1	42 Квазистационарный, начиная с юры до современного, из основания осадочного разреза (7012 м)
J ₁ tg / 3080	99	–	100	+1	
D ₃ lg / 3117	–	163 (1.12)	163	0	227 Пермо-триасовый максимум 250 млн л.н. (4912 м)

Примечания. 1. Глубина положения образца для определения ОСВ 250 млн л.н. – 1017 м. 2. Переход от ОСВ (R_{vt}^0) к температуре осуществляется по диаграмме «Линии значений отражательной способности витринита» [21], совмещенной с измененной схемой Коннона [22]. 3. Значения ОСВ определены в Лаборатории геохимии нефти и газа ИНГГ СО РАН (г. Новосибирск).

Notes. 1. Sample depth for vitrinite reflectance determination in 250 Ma ago – is 1017 m. 2. The transition from vitrinite reflectance (R_{vt}^0) to a temperature is performed by the diagram “Vitrinite reflectance lines” [21] combined with modified Connon’s scheme [22]. 3. Vitrinite reflectance were determined in the Laboratory of Petroleum Geochemistry in Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk).

Выбор скважины Южно-Урманская 1 для выполнения палеотемпературного моделирования также обусловлен уникальностью тепловых и геологических характеристик разреза, вскрываемого скважиной. Скважина Южно-Урманская 1 вскрыла тогурскую свиту, являющуюся нефтематеринской для нижнеюрского и, возможно, доюрского НГК. Палеотемпературная модель данной скважины является уникальной среди скважин, для которых ранее выполнялось моделирование [11] (Герасимовская 12, Останинская 438, Сельвейкинская 2, Урманская 5), поскольку в кровле палеозоя этой скважиной вскрыты отложения раннего девона.

Значение современного теплового потока из основания палеозойского разреза – 44 мВт/м². Значения температур, определенных по ОСВ в доюрских отложениях, составляют 143 и 147 °С. Кроме того, в скважине получены притоки нефти и незначительные газопроявления из испытанных интервалов внутреннего палеозоя (табл. 1).

Стратиграфическая принадлежность и мощность отложений, слагающих осадочный разрез скважины Южно-Урманская 1, приняты в соответствии с литолого-стратиграфической разбивкой скважины (материалы ТФ ТФГИ СФО). Разбивка дополнена

реконструкцией стратиграфического разреза (табл. 4), включая девонско-силурийские отложения, не вскрытые скважиной (по [16]). Возраст отложений, вскрытых в кровле палеозоя, – раннедевонский (по материалам отчетов ТФ ТФГИ СФО).

Тип разреза в районе скважины Южно-Урманская 1, как и в скважине Урманская 5, рифогенный. В разрезе есть два перерыва в осадконакоплении. Первый, непродолжительный по времени, соответствует первой половине эйфельского века. Второй, длительностью 122.4 млн лет, начинается в среднекаменноугольном отделе, в завершающей тектонической фазе герцинской складчатости, и продолжается вплоть до начала накопления нижнеюрских отложений. Этот перерыв сопровождается масштабной денудацией отложений от каменноугольных до нижнедевонских. Раннедевонские отложения перекрыты углисто-аргиллитовой плинсбахской пачкой урманской свиты.

При решении обратных задач геотермии «невязка» расчетных и измеренных геотемператур соответствует оптимальной, т.е. не превышает ±2 °С (табл. 5, рис. 5). Модель динамики теплового потока для скважины Южно-Урманская 1 проиллюстрирована на рисунках 3 и 6.

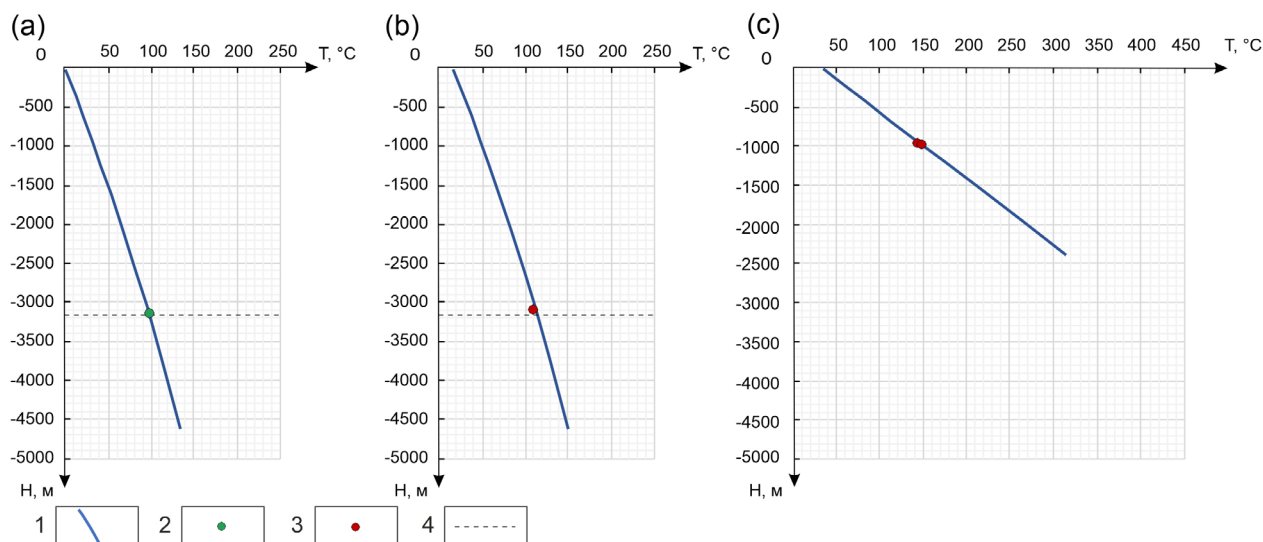


Рис. 5. Сопоставление расчетных и измеренных геотемператур в скважине Южно-Урманская 1 для современного разреза (а), на время мезозойско-кайнозойского палеотемпературного максимума – 24 млн л.н. (б), на время палеозойского палеотемпературного максимума 250 млн. лет назад (с): 1–3 – геотемпературы (1 – расчетные; 2 – измеренные пластовые; 3 – определенные по ОСВ); 4 – положение подошвы осадочного чехла.

Fig. 5. Matching of modelled and experimental geotemperatures in the Yuzhno-Urman 1 well for present-day sequence (a), for sequence at the period of the Mesozoic-Cenozoic paleotemperature maximum – 24 Ma ago (b), for sequence at the period of the Paleozoic paleotemperature maximum – 250 Ma ago (c): 1–3 – geotemperatures (1 – modelled; 2 – measured formation temperature; 3 – measured by vitrinite reflectance); 4 – the bottom of the sedimentary cover.

Таблица 4. Осадочный разрез скважины Южно-Урманская 1, выполненный на основании литолого-стратиграфической разбивки и реконструкции стратиграфического разреза**Table 4.** Sedimentary sequence in area of the Yuzhno-Urman 1 well, which is composed by lithological and stratigraphic data and stratigraphic reconstruction

Индекс отложений (см. рис. 7)	Отложения Возраст	Время накопления			Мощность, м	Кровля свиты, м
		Начало, млн л.н.	Окончание, млн л.н.	Продолжительность, млн лет		
Kz	Четвертичные отложения Q	1.64	0	1.64	1	0
	Плиоценовые N ₂	4.71	1.64	3.07	1	1
	Миоценовые N ₁	24	4.71	19.29	6	2
	Некрасовская серия Pg ₃ nk Средний–верхний олигоцен	32.3	24	8.3	140	8
	Чеганская свита Pg _{2,3} hq Верхний эоцен – олигоцен	41.7	32.3	9.4	30	148
	Люлинворская свита Pg ₂ ll Эоцен	54.8	41.7	13.1	75	178
	Талицкая свита Pg ₁ tl Палеоцен	61.7	54.8	6.9	63	253
K	Ганькинская свита Pg ₁ –K ₂ gn Маастрихт–даний	73.2	61.7	11.5	140	316
	Славгородская свита K ₂ sl Верхний сантон – кампан	86.5	73.2	13.3	54	456
	Ипатовская свита K ₂ ip Коньяк – нижний сантон	89.8	86.5	3.3	159	510
	Кузнецовская свита K ₂ kz Турон	91.6	89.8	1.8	20	669
	Покурская свита K ₁₋₂ pk Верхний апт – альб – сеноман	114.1	91.6	22.5	951	689
	Алымская K ₁₋₂ a Апт	120.2	114.1	6.1	0	–
	Киялинская свита K ₁ kl Готерив–баррем	132.4	120.2	12.2	661	1640
	Тарская свита K ₁ tr Валанжин	136.1	132.4	3.7	77	2301
	Куломзинская свита K ₁ klm Берриас–валанжин	145.8	136.1	9.7	239	2378
J ₃ bg	Баженовская свита J ₃ bg Титон	151.2	145.8	5.4	29	2617
J ₃	Георгиевская свита J ₃ qr Киммеридж	156.6	151.2	5.4	0	–
	Наунакская свита J ₃ nn Келловей–оксфорд	162.9	156.6	6.3	82	2646
J ₂ tm	Тюменская свита J ₂ tm Байос–бат	170.3	162.9	7.4	277	2728
J ₁₋₂	Салатская свита J ₁₋₂ sl Нижний тоар – нижний байос	178.1	170.3	7.8	90	3005
J ₁ tg	Тогурская свита J ₁ tg Нижний тоар	182.7	178.1	4.6	22	3095
J ₁	Урманская свита J ₁ ur Плинсбах – нижний тоар	190.8	182.7	8.1	30	3117
–	Размыв елизаровской, средневасюганской, табаганской, лугинецкой, герасимовской, надеждинской и солоновской свит	313.2	190.8	122.4	–2264	–

C ₁₋₂	Елизаровская свита C ₂ elz Башкирский век	320.2	313.2	7	100	–
	Средневажюганская свита C ₁₋₂ sv Верхний серпухов – башкирский век	326.2	320.2	6	150	–
	Табаганская свита C ₁ tb Турне – средний серпухов	358.9	326.2	32.7	334	–
D ₃ lg	Лугинецкая свита D ₃ lg Фран-фамен	382.7	358.9	23.8	600	–
D ₁₋₂	Герасимовская свита D ₂ gs Верхний эйфель – живет	390.5	382.7	7.8	700	–
	Перерыв (скрытое несогласие) Нижний эйфель	393.3	390.5	28	0	–
	Надеждинская свита D ₁ nd Верхний эмс	400.5	393.3	7.2	200	–
	Солоновская свита D ₁ sl Нижний эмс	407.6	400.5	7.1	180	–
	Армичевская свита D ₁ rm Прага	410.8	407.6	3.2	270*	3147
D ₁ ks	Кыштовская свита D ₁ ks Лохков	419.2	410.8	8.4	400	3417
S ₂	Межовская свита S ₂ mv Лудлов–пржидол	427.4	419.2	8.2	360	3817
S ₁ lr	Ларинская свита S ₁ lr Лландовери–венлок	443.4	427.4	16	450	4177

*Показана мощность армичевской свиты, которая частично вскрыта бурением (вскрытая мощность составляет 56 м).

*Thickness of Armich formation, which is partially exposed by drilling (exposed thickness is 56 m).

Примечания. 1. Глубина реконструированного разреза 4627 м. 2. Фактический забой скважины 3203 м. 3. Серой заливкой выделены строки, показывающие размыв отложений и перерыв осадконакопления среднедевонских отложений; розовой – строки, отражающие потенциально нефтематеринские свиты; зеленой – мощности отложений, вскрытых бурением, желтой – реконструированные мощности отложений.

Notes. 1. Depth of reconstructed well section is 4627 m. 2. Real well depth is 3203 m. 3. Rows, which contain periods of denudation and break in the Middle Devonian, are highlighted in grey, which contain oil-source rocks, are highlighted in pink. Thicknesses of formations, which are exposed by drilling, are highlighted in green and reconstructed thicknesses of formations are highlighted in yellow.

Таблица 5. Скважина Южно-Урманская 1. Измеренные и расчетные температуры, рассчитанный тепловой поток
Table 5. The Yuzhno-Urman 1 well. Experimental and modelled temperatures, calculated deep heat flow

Приуроченность / глубина, м	Температура, °C				Тепловой поток, мВт/м ² . Динамическая характеристика (глубина палеозойского осадочного разреза)
	Пластовая измеренная	По ОСВ (R_{vt}^0)	Модельная (расчетная)	Разница расчет- ной и измерен- ной	
J ₁₋₂ sl / 3090	–	111 (0.73)	113	+2	44 Квазистационарный, начиная с юры до современного, из основания оса- дочного разреза (4627 м)
J ₁ ur / 3138	99	–	97	–2	
D ₁ rm / 3181	–	143 (0.97)	144	+1	214 Пермо-триасовый скачок 250 млн л.н. (2400 м)
D ₁ rm / 3203	–	147 (1)	147	0	

Примечания. 1. Глубина положения образца для определения ОСВ 250 млн л.н. – 954 и 976 м. 2. Переход от ОСВ (R_{vt}^0) к температуре осуществляется по диаграмме «Линии значений отражательной способности витринита» [21], совмещенной с измененной схемой Коннона [22]. 3. Значения температур по ОСВ определены в Лаборатории геохимии нефти и газа ИНГТ СО РАН (г. Новосибирск).

Notes. 1. Sample depth for vitrinite reflectance determination in 250 Ma ago – 954 m and 976 m. 2. The transition from vitrinite reflectance (R_{vt}^0) to a temperature is performed by the diagram “Vitrinite reflectance lines” [21] combined with modified Connon’s scheme [22]. 3. Vitrinite reflectance were determined in the Laboratory of Petroleum Geochemistry in Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk).

Результаты исследования

Скважина Урманская 5

В формировании нефтегазоносности доюрского фундамента в скважине Урманская 5 участвует только резервуар внутреннего палеозоя (M_1). Резервуар коры выветривания не сохранился до нашего времени. Резервуар внутреннего палеозоя (вскрытая мощность 218 м) обусловлен эпигенетическими процессами в коре выветривания. Коллекторские свойства (трещиноватость, поры, каверны выщелачивания) наблюдаются до глубины 200 м от поверхности эрозии. Вторичные коллекторы сформиро-

вались не раньше 213–183 млн л.н. в период предъюрского перерыва в осадконакоплении.

В качестве потенциально нефтематеринских свит для скважины Урманская 5 приняты баженовская (J_3bg), тюменская (J_2tm), тогурская (J_1tg), лугинецкая (D_3lg), кыштовская (D_1ks) и ларинская (S_1lr) свиты.

Ниже представлены результаты анализа периодов существования активных очагов генерации нефти (главная фаза нефтеобразования, ГФН), газа и газоконденсата (главная фаза газообразования, ГФГ) в каждой из перечисленных выше потенциально материнских свит (табл. 6, рис. 6).

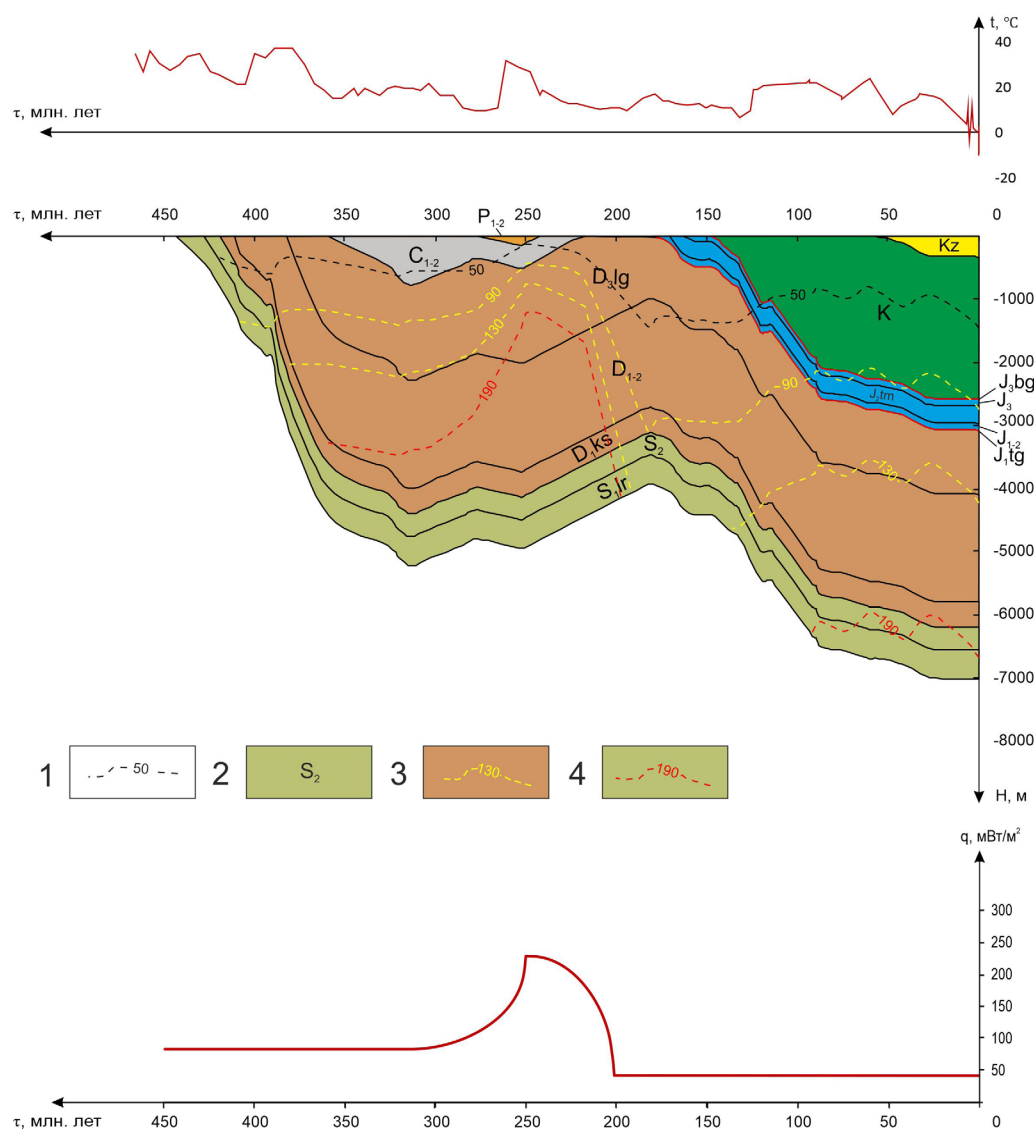


Рис. 6. Палеорекострукции тектонической и термической истории в районе скважины Урманская 5: 1 – изотермы; 2 – стратиграфическая приуроченность отложений; 3 – изотермы граничных температур ГФН; 4 – изотерма начала деструкции УВ. В верхней части рисунка приведен палеоклиматический график, в нижней – график динамики теплового потока.

Fig. 6. Tectonic and thermal history paleoreconstructions in the area of the Urman 5 well: 1 – isotherms; 2 – stratigraphic sediment confinement; 3 – isotherms of oil window; 4 – the lower isotherm of hydrocarbon destruction. The paleoclimate graph is in the top of the figure, the graph of deep heat flow dynamics is in the bottom of the figure.

Таблица 6. Расчетные геотемпературы потенциально нефтематеринских свит в разрезе скважины Урманская 5
Table 6. Calculated geotemperatures in potential oil-source formations in the section of the Uрман 5 well

Время, млн л.н.	«Местный» вековой ход температур, °C	Тепловой поток, мВт/м ²	Баженовская (J ₃ bg)	Тюменская (J ₂ tm)	Тогурская (J ₁ tg)	Лугинецкая (D ₃ lg)	Кыштовская (D ₁ ks)	Ларинская (S ₁ lr)
Геотемпературы, °C (в скобках глубина центра свиты, м)								
0	0	42	85 (2590)	92 (2830)	99 (3070)	113 (3580)	174 (6000)	192 (6790)
1.64	1	42	87 (2580)	94 (2820)	102 (3060)	115 (3570)	176 (5990)	194 (6780)
4.71	3	42	89 (2570)	97 (2820)	104 (3060)	118 (3570)	179 (5990)	197 (6770)
24	16	42	101 (2570)	108 (2810)	115 (3050)	129 (3560)	189 (5980)	208 (6770)
32.3	16	42	97 (2490)	105 (2740)	112 (2980)	125 (3490)	185 (5910)	204 (6690)
41.7	12	42	88 (2350)	95 (2590)	102 (2830)	115 (3340)	175 (5760)	194 (6550)
54.8	19	42	93 (2260)	100 (2500)	107 (2740)	121 (3250)	182 (5670)	200 (6460)
61.7	22	42	95 (2250)	102 (2490)	108 (2730)	122 (3240)	182 (5660)	201 (6450)
73.2	16	42	85 (2130)	92 (2380)	99 (2620)	113 (3130)	173 (5550)	192 (6330)
86.5	22	42	88 (2080)	95 (2320)	102 (2560)	116 (3080)	176 (5500)	194 (6280)
89.8	22	42	83 (1920)	90 (2160)	97 (2400)	111 (2920)	171 (5340)	190 (6120)
91.6	22	42	80 (1910)	87 (2150)	94 (2390)	107 (2900)	168 (5320)	186 (6100)
114.1	21	42	52 (1020)	59 (1270)	66 (1510)	80 (2020)	140 (4440)	158 (5220)
116.3	18	42	51 (1020)	58 (1270)	65 (1510)	78 (2020)	139 (4440)	157 (5220)
120.2	19	42	48 (1020)	55 (1260)	62 (1510)	75 (2020)	134 (4440)	152 (5220)
132.4	14	42	22 (340)	29 (580)	36 (820)	50 (1330)	110 (3750)	128 (4540)
136.1	10	42	20 (260)	27 (500)	34 (750)	48 (1260)	108 (3680)	126 (4460)
145.8	12	42	13 (10)	20 (250)	27 (500)	41 (1010)	101 (3430)	120 (4210)
151.2	14	42		20 (230)	27 (470)	41 (980)	101 (3400)	120 (4190)
156.6	14	42		20 (230)	27 (470)	41 (980)	101 (3400)	120 (4190)
162.9	15	42		19 (140)	26 (380)	39 (890)	99 (3310)	118 (4100)
170.3	16	42			19 (100)	33 (610)	94 (3030)	112 (3820)
178.1	16	42			16 (10)	30 (520)	90 (2940)	109 (3730)
182.7	13	42				26 (500)	87 (2920)	105 (3700)
217	14	179				92 (750)	363 (3420)	440 (4200)
241.9	28	224				174 (1110)	512 (3780)	610 (4570)
250	31	227				191 (1230)	525 (3900)	623 (4690)
252.2	32	190				169 (1260)	451 (3930)	533 (4720)
276.6	14	111				87 (1110)	255 (3780)	303 (4570)
285.3	17	99				89 (1210)	239 (3880)	283 (4670)
302.7	20	86				94 (1410)	226 (4080)	264 (4870)
313.2	20	84				99 (1530)	228 (4200)	265 (4990)
320.2	17	84				90 (1410)	219 (4080)	255 (4870)
326.2	20	84				81 (1210)	210 (3880)	247 (4670)
358.9	30	84				68 (750)	196 (3420)	233 (4200)
382.7	34	84					125 (1920)	161 (2700)
390.5	22	84					64 (890)	101 (1680)
393.3	22	84					64 (890)	101 (1680)
400.5	24	84					56 (670)	93 (1460)
407.6	27	84					49 (470)	86 (1260)
410.8	29	84					39 (200)	75 (980)
419.2	34	84						61 (580)
427.4	29	84						39 (220)

Примечания. 1. Температура определена на глубине центра свиты. 2. Серо-голубой заливкой показаны температуры ГФН; желтой – температуры ГФГ; фиолетовой – температуры, превышающие 190 °C (вызывающие деструкцию УВ). 3. Времена палеотемпературных максимумов в мезозойско-кайнозойских и палеозойских отложениях показаны бежевой заливкой.

Notes. 1. Temperature is calculated for the depth of formation centre. 2. Temperatures of oil window are highlighted in light-blue, temperatures of gas window are highlighted in yellow. Temperatures higher than 190 °C (cause hydrocarbon destruction) are highlighted in light-purple. 3. Stratigraphic age of paleotemperature maximums in the Mesozoic-Cenozoic and the Paleozoic rocks are highlighted in beige.

Результаты палеотемпературного моделирования показывают, что *ларинская* (S_1lr) и *кыштовская* (D_1ks) свиты 359–217 млн л.н. подверглись воздействию колоссальных температур, достигающих 250 млн л.н. 623 и 525 °С соответственно. Ввиду этого перечисленные свиты не могут в дальнейшем рассматриваться нами в качестве возможных источников генерации углеводородов, заполняющих ловушки в доюрских отложениях.

Лугинецкая (D_3lg) свита 320–285 млн л.н. вошла в главную фазу нефтеобразования. Далее температуры в свите снизились. 252 млн л.н. свита входит в главную фазу газообразования. Поскольку мощность лугинецкой свиты значительная (в модели задается 1500 м), то во время палеотемпературного максимума (250 млн л.н.) в интервале свиты существовал широкий температурный диапазон от 95 до 286 °С, причем температура 190 °С соответствовала центру свиты (на глубине 1232 м). Ко времени формирования резервуара внутреннего палеозоя 500 м отложений лугинецкой свиты были размыты. Тогда температура в сохранившихся до настоящего времени отложениях верхней половины лугинецкой свиты изменялась в диапазоне от 159 до 190 °С. Следовательно, можно сделать вывод о том, что верхняя часть лугинецкой свиты мощностью около 250 м 35 млн лет входила в главную фазу газообразования (252–217 млн л.н.). Нижняя часть лугинецкой свиты подверглась воздействию деструктивных температур (рис. 6). Поэтому можно предположить существование лугинецкого очага генерации газа в период 252–217 млн л.н.

Тогурская (J_1tg) свита 92 млн л.н. входит в главную фазу нефтеобразования и находится в ней до настоящего времени. Отложения свиты не подвергались воздействию деструктивных температур. Все это время тогурская свита может являться источником нефти для залежей в доюрском комплексе.

Тюменская (J_2tm) свита 90 млн л.н. входит в главную фазу нефтеобразования и также находится в ней вплоть до настоящего времени. Тюменский источник может заполнять нефтью резервуар внутреннего палеозоя в течение почти 90 млн лет. Геотемпературы резервуара благоприятны для сохранности тюменской нефти.

Баженовская (J_3bg) свита впервые входит в главную фазу нефтеобразования 62 млн л.н. на 20 млн лет. Во второй раз свита входит в главную фазу нефтеобразования 32 млн л.н. на 27 млн лет. 5 млн л.н. температуры в свите упали ниже 90 °С. Таким образом, баженовская свита суммарно находилась в низкотемпературной главной фазе нефтеобразования 47 млн лет. Все это время баженовский источник может заполнять нефтью резервуар внутреннего палеозоя.

В результате испытаний интервалов внутреннего палеозоя (табл. 1) получены малодобитный свободный газ и нефть. ГФГ верхней части лугинецкой свиты длилась 35 млн лет и завершилась за 4–34 млн лет до формирования резервуара внутреннего палеозоя, поэтому можно ожидать сохранность лугинецкого газа. После формирования резервуара в главной фазе нефтеобразования продолжительное время находились юрские баженовская, тюменская и тогурская свиты. Поэтому с наибольшей вероятностью палеозойский резервуар является аккумулятором палеозойского лугинецкого газа и юрской нефти.

Скважина Южно-Урманская 1

В формировании нефтегазоносности доюрского фундамента в скважине Южно-Урманская 1 участвует только резервуар внутреннего палеозоя (M_1). Резервуар коры выветривания сформировался в период 213–191 млн л.н., но не сохранился до нашего времени. Резервуар внутреннего палеозоя (вскрытая мощность 56 м) обусловлен эпигенетическими процессами в коре выветривания (мощность вторичных коллекторов до 400–500 м). Вторичные коллекторы сформировались не раньше 213–191 млн л.н. в период предъюрского перерыва в осадконакоплении.

В качестве потенциально нефтематеринских свит для скважины Южно-Урманская 1 приняты баженовская (J_3bg), тюменская (J_2tm), тогурская (J_1tg), кыштовская (D_1ks) и ларинская (S_1lr) свиты.

Ниже представлены результаты анализа периодов существования активных очагов генерации нефти, газа и газоконденсата в каждой из перечисленных выше потенциально нефтематеринских свит (табл. 7, рис. 7).

Результаты палеотемпературного моделирования показывают, что *ларинская* (S_{1lr}) свита дважды подверглась воздействию деструктивных для углеводородов температур: в первый раз 313–302 млн л.н., во второй – 261–215 млн л.н. Максимальная температура в центре свиты составила 289 °С. Следовательно, свита не может рассматриваться как возможный источник углеводородов для залежей внутреннего палеозоя.

Кыштовская (D_{1ks}) свита в период 383–359 млн л.н. вошла в главную фазу нефтеобразования. Отложения находились в ГФН

24 млн лет. Далее 359–277 млн л.н. температуры повысились, и свита на 82 млн лет вошла в ГФГ. После воздымания территории в позднегерцинское время и начала денудационных процессов температура в свите начала уменьшаться и 277 млн л.н. составляла 127 °С. Но уже к 261 млн л.н. во время становления мантийного суперплюма свита вновь вошла в ГФГ. Во время палеотемпературного максимума 250 млн л.н. свита нагрелась от кровли до подошвы до 173–220 °С. Таким образом, верхняя часть свиты мощностью 145 м не подверглась воздействию деструктивных темпе-

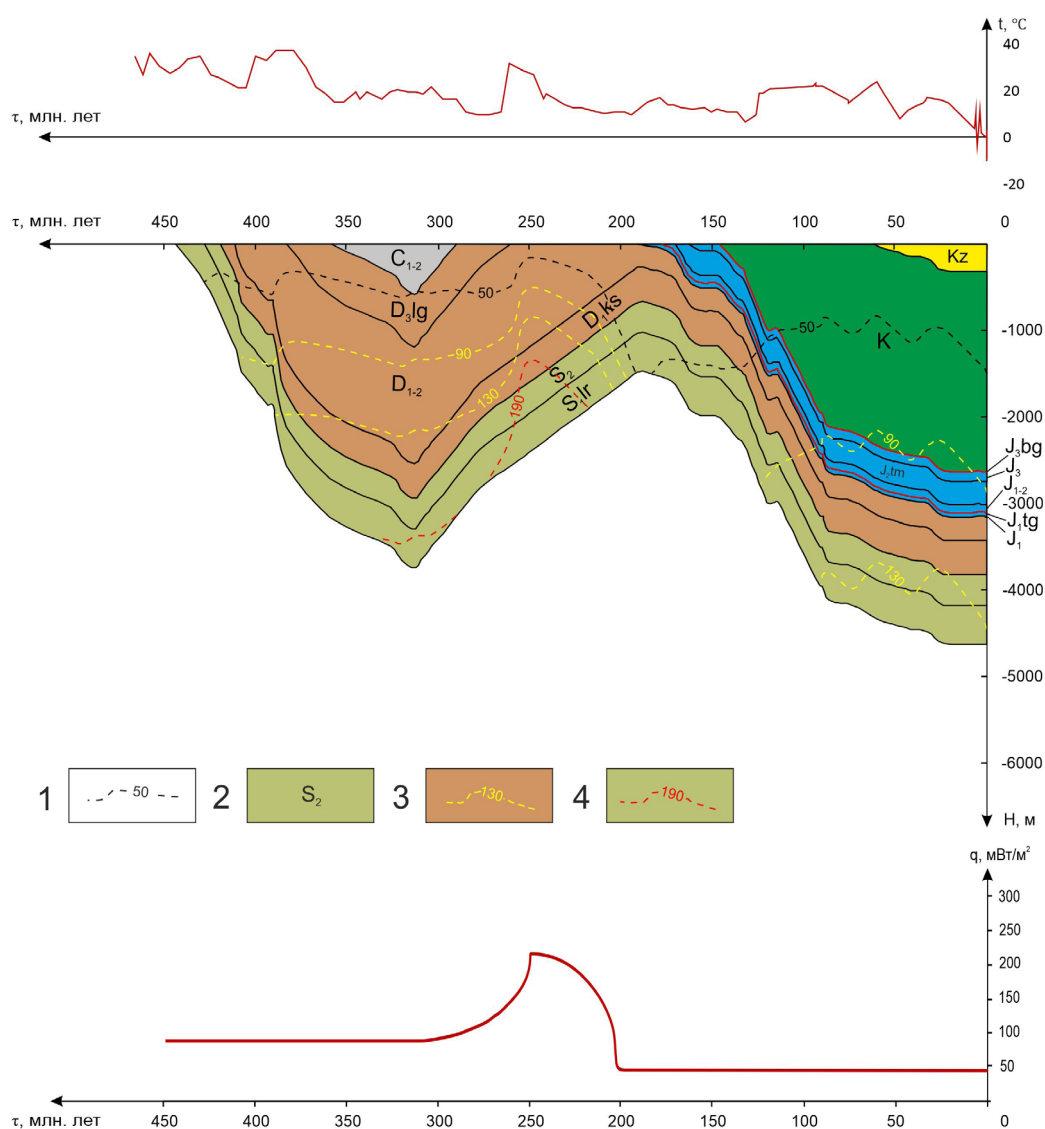


Рис. 7. Палеорекострукции тектонической и термической истории в районе скважины Южно-Урманская 1: 1 – изотермы; 2 – стратиграфическая приуроченность отложений; 3 – изотермы граничных температур ГФН; 4 – изотерма начала деструкции УВ. В верхней части рисунка приведен палеоклиматический график, в нижней – график динамики теплового потока.

Fig. 7. Tectonic and thermal history paleoreconstructions in the area of the well Yuzhno-Urman 1: 1 – isotherms; 2 – stratigraphic sediment confinement; 3 – isotherms of oil window; 4 – the lower isotherm of hydrocarbon destruction. The paleoclimate graph is in the top of the figure, the graph of deep heat flow dynamics is in the bottom of the figure.

Таблица 7. Расчетные геотемпературы (в °C) потенциально нефтематеринских свит в разрезе скважины Южно-Урманская 1**Table 7.** Calculated geotemperatures (in °C) in potential oil-source formations in the section of the Yuzhno-Urman 1 well

Время, млн л.н.	«Местный» вековой ход температур, °C	Тепловой поток, мВт/м ²	Баженовская (J ₃ bg)	Тюменская (J ₂ tm)	Тогурская (J ₁ tg)	Кыштовская (D ₁ ks)	Ларинская (S ₁ lr)
Геотемпературы, °C (в скобках глубина центра свиты, м)							
0	0	44	83 (2630)	90 (2870)	97 (3110)	110 (3620)	129 (4400)
1.64	1	44	85 (2630)	92 (2870)	99 (3100)	112 (3620)	131 (4400)
4.71	3	44	88 (2630)	94 (2860)	101 (3100)	114 (3620)	134 (4400)
24	16	44	100 (2620)	106 (2860)	113 (3100)	126 (3610)	145 (4390)
32.3	16	44	94 (2480)	101 (2720)	108 (2960)	121 (3470)	140 (4250)
41.7	12	44	89 (2450)	96 (2690)	102 (2930)	115 (3440)	134 (4220)
54.8	19	44	94 (2380)	101 (2610)	108 (2850)	121 (3360)	140 (4150)
61.7	22	44	95 (2320)	101 (2550)	108 (2790)	121 (3300)	140 (4090)
73.2	16	44	84 (2180)	90 (2410)	97 (2650)	110 (3160)	129 (3950)
86.5	22	44	87 (2120)	94 (2360)	101 (2600)	114 (3110)	133 (3890)
89.8	22	44	83 (1960)	89 (2200)	96 (2440)	109 (2950)	128 (3730)
91.6	22	44	79 (1940)	86 (2180)	93 (2420)	105 (2930)	124 (3710)
114.1	21	44	50 (990)	57 (1230)	63 (1470)	76 (1980)	95 (2760)
116.3	18	44	49 (990)	55 (1230)	62 (1470)	75 (1980)	94 (2760)
120.2	19	44	47 (990)	54 (1230)	60 (1460)	73 (1980)	92 (2760)
132.4	14	44	21 (330)	28 (570)	35 (800)	48 (1320)	67 (2100)
136.1	10	44	19 (250)	26 (490)	33 (730)	46 (1240)	65 (2020)
145.8	12	44	13 (10)	20 (250)	26 (490)	39 (1000)	58 (1780)
151.2	14	44		20 (220)	26 (460)	39 (970)	59 (1760)
156.6	14	44		20 (220)	26 (460)	39 (970)	59 (1760)
162.9	15	44		18 (140)	25 (380)	38 (890)	57 (1670)
170.3	16	44			19 (100)	32 (610)	52 (1400)
178.1	16	44			16 (10)	29 (520)	49 (1310)
182.7	13	44				26 (500)	45 (1280)
190.8	12	44				24 (470)	43 (1260)
202.4	11	87				39 (650)	71 (1440)
215.3	14	164				92 (850)	163 (1640)
250	31	214				196 (1390)	289 (2180)
260.5	11	143				136 (1550)	199 (2340)
276.6	14	110				127 (1800)	174 (2580)
290.3	20	90				138 (2150)	180 (2940)
303.4	21	87				147 (2480)	186 (3270)
309.3	21	87				154 (2630)	193 (3420)
313.2	20	87				159 (2730)	197 (3520)
320.2	17	87				150 (2630)	188 (3420)
326.2	20	87				145 (2480)	183 (3270)
358.9	30	87				137 (2150)	176 (2940)
382.7	34	87				110 (1550)	148 (2340)
390.5	22	87				64 (850)	102 (1640)
393.3	22	87				64 (850)	102 (1640)
400.5	24	87				56 (650)	94 (1440)
407.6	27	87				50 (470)	88 (1260)
410.8	29	87				39 (200)	77 (980)
419.2	34	87					62 (580)
427.4	29	87					40 (220)

Примечания. 1. Температура определена на глубине центра свиты. 2. Серо-голубой заливкой показаны температуры ГФН; желтой – температуры ГФГ; фиолетовой – температуры, превышающие 190 °C (вызывающие деструкцию УВ). 3. Времена палеотемпературных максимумов в мезозойско-кайнозойских и палеозойских отложениях показаны бежевой заливкой.

Notes. 1. Temperature is calculated for the depth of formation centre. 2. Temperatures of oil window are highlighted in light-blue; temperatures of gas window are highlighted in yellow. Temperatures higher than 190 °C (cause hydrocarbon destruction) are highlighted in light-purple. 3. Stratigraphic age of paleotemperature maximums in the Mesozoic-Cenozoic and the Paleozoic rocks are highlighted in beige.

ратур и продолжила находиться во второй ГФГ (261–215 млн л.н.). Верхняя часть кыштовской свиты может являться источником газа для залежей в доюрских отложениях.

Тогурская (J_1tg) свита 92 млн л.н. входит в главную фазу нефтеобразования и находится в ней до настоящего времени. *Тюменская* (J_2tm) свита 87 млн л.н. входит в главную фазу нефтеобразования и находится в ней до настоящего времени. *Баженовская* (J_3bg) свита впервые входит в главную фазу нефтеобразования 62 млн л.н. на 20 млн лет. Во второй раз она входит в главную фазу нефтеобразования 32 млн л.н. на 27 млн лет. 5 млн л.н. температуры в свите упали ниже 90 °С. Баженовская свита суммарно находилась в главной фазе нефтеобразования 47 млн лет. Таким образом, тогурская, тюменская и баженовская свиты могут являться источниками нефти 92 млн лет, 87 млн лет и 47 млн лет соответственно.

Термическая история тогурской, тюменской и баженовской свит показала, что эти свиты могут выступать в качестве источников нефти для заполнения резервуара внутреннего палеозоя. Кыштовская свита, в свою очередь, может являться источником газа. Предварительный прогноз подтверждается результатами опробования. В результате испытаний интервалов внутреннего палеозоя получены незначительные газопроявления и нефть. Поэтому с наибольшей вероятностью можно говорить о сохранности в палеозойском резервуаре палеозойского кыштовского газа и юрской нефти.

Обсуждение результатов

Результаты выполненного для Урманского месторождения палеотемпературного моделирования на примере скважин Урманская 5 и Южно-Урманская 1 позволяют сделать выводы о вероятных источниках формирования залежей УВ в доюрском нефтегазоносном комплексе.

В обеих скважинах по результатам испытаний был получен в небольшом количестве свободный газ. Благоприятные условия для генерации газа существовали только в палеозойских потенциально нефтематеринских свитах. Для основной залежи в районе сква-

жины Урманская 5 источником газа предполагается позднедевонская лугинецкая свита, а для залежи в Южно-Урманском куполе в районе скважины Южно-Урманская 1 – скорее всего, раннедевонская кыштовская свита. Небольшой дебит газа, полученный в результате испытаний, объясняется лишь частичной его сохранностью в силу того, что главная фаза газообразования завершилась за 2–4 млн лет до формирования резервуара внутреннего палеозоя.

Согласно результатам моделирования, в обеих скважинах источник нефти имеет юрский возраст. Потенциально нефтематеринскими могут быть тогурская, тюменская и/или баженовская свиты. Все эти три свиты длительное время находились в главной фазе нефтеобразования после формирования резервуара внутреннего палеозоя.

Проникновение юрской нефти в доюрское основание – с геологических позиций весьма сложный процесс, так как флюидообмен между палеозойскими и мезозойскими породами отмечается только на локальных участках и лишь в зоне непосредственного контакта между ними. Однако в районе скважины Урманская 5 установлено, что девонские отложения лугинецкой свиты непосредственно перекрыты аргиллитами тогурской свиты. Геологическое строение разреза в районе скважины Южно-Урманская 1 также не препятствует миграции юрской нефти в палеозойское основание. Палеозойские вторичные коллекторы перекрыты непосредственно юрскими отложениями. Тогурская свита удалена от кровли палеозоя всего на 30 м (мощность урманской свиты). Следовательно, можно рассматривать возможность миграции юрской нефти в ловушки, сформированные в палеозойских отложениях.

Эти заключения не противоречат результатам геохимических исследований. Так, авторами [23] было показано, что исследованные образцы нефти горизонта $M+M_1$ из скважины Урманская 2 (вскрывшей, как и скважина Урманская 5, Центральную залежь Урманского месторождения) имеют смешанный генезис или являются смесью нефтей

из двух источников – морского и континентального генезиса со значительным вкладом континентальной органики в исходное органическое вещество [24]. Принимая во внимание результаты палеотемпературного моделирования, «палеозойская» нефть Урманского месторождения, скорее всего, представляет собой смесь тогурской и/или тюменской нефти континентального генезиса и баженовской нефти морского генезиса.

Заключение

На примере скважин Урманская 5 и Южно-Урманская 1 Урманского месторождения выявлены вероятные источники залежей УВ в доюрском нефтегазоносном комплексе.

Источниками полученного в результате испытаний газа могут быть только палеозойские потенциально нефтематеринские свиты: в районе скважины Урманская 5 – позднедевонская лугинецкая свита, в районе скважины Южно-Урманская 1 – раннедевонская кыштовская свита.

Источник нефти в обеих скважинах имеет юрский возраст: тогурская, тюменская и/или баженовская свиты. Полученные нами результаты восстановления термической истории потенциально нефтематеринских отложений и результаты геохимических исследований позволяют заключить следующее: нефти палеозойских залежей Урманского месторождения представляют собой смесь флюидов из 2 юрских источников: предположительно нефтематеринской породы континентального генезиса со значительным вкладом гумусового или гумусово-сапропелевого озерного органического вещества (тогурская и/или тюменская свиты) и нефтематеринской породы морского генезиса (баженовская свита).

Таким образом, исследование показало, что палеозойский резервуар Урманского месторождения аккумулирует частично сохранившийся газ, источником которого являются палеозойские нефтематеринские (кыштовская и лугинецкая) свиты, и нефть, представляющую собой смесь юрской нефти морского (баженовская) и континентального (тогурская и/или тюменская) генезисов.

Список литературы

1. Жилина И.В., Утопленников В.К. **2018**. Ресурсная база углеводородного сырья Волго-Уральской и Тимано-Печорской нефтегазоносных провинций, перспективы ее восполнения. *Актуальные проблемы нефти и газа*, 3(22): 1–13. http://oilgasjournal.ru/issue_22/zhilina.pdf
2. Liu X., Jin Z., Bai G., Liu J., Guan M., Pan Q., Li T. **2017**. A comparative study of salient petroleum features of the Proterozoic–Lower Paleozoic succession in major petroliferous basins in the world. *Energy Exploration & Exploitation*, 35(1): 54–74. <https://doi.org/10.1177/0144598716680308>
3. Li D., Chang J., Qiu N., Wang J., Zhang M., Wu X., Han J., Li H., Ma A. **2022**. The thermal history in sedimentary basins: A case study of the central Tarim Basin, Western China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 229: 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2022.105149>
4. Zhu G., Milkov A.V., Li J., Xue N., Chen Y., Hu J., Li T., Zhang Z., Chen Z. **2021**. Deepest oil in Asia: Characteristics of petroleum system in the Tarim basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 199: 108246. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108246>
5. Запивалов Н.П., Исаев Г.Д. **2010**. Критерии оценки нефтегазоносности палеозойских отложений Западной Сибири. *Вестник Томского государственного университета*, 341: 226–232.
6. Вышемирский В.С., Запивалов Н.П., Бадмаева Ж.О., Бененсон В.А., Доильницын Е.Ф., Дубатовов В.Н., Зингер А.С., Кунин Н.Я., Московская В.И., Перцева А.П. и др. **1984**. *Органическая геохимия палеозойских отложений юга Западно-Сибирской плиты*. Новосибирск: Наука, 192 с.
7. Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К., Сурков В.С., Трофимук А.А., Эрвье Ю.Г. **1975**. *Геология нефти и газа Западной Сибири*. М.: Недра, 680 с.
8. Сурков В.С., Жеро О.Г. **1981**. *Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты*. М.: Недра, 143 с.
9. Ablya E., Nadezhkin D., Bordyug E., Korneva T., Kodlaeva E., Mukhutdinov R., Sugden M.A., Van Bergen P.F. **2008**. Paleozoic-sourced petroleum systems of the Western Siberian Basin – what is the evidence? *Organic Geochemistry*, 39(8): 1176–1184. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2008.04.008>
10. Коржов Ю.В., Исаев В.И., Кузина М.Я., Лобова Г.А. **2013**. Генезис доюрских залежей нефти Рогожниковской группы месторождений (по результатам изучения вертикальной зональности алканов). *Известия Томского политехнического университета*, 323(1): 51–56. EDN: RAFBJH
11. Исаев В.И., Галиева М.Ф., Лобова Г., Кузьменков С.Г., Старостенко В.И., Фомин А.Н. **2022**. Палеозойские и мезозойские очаги генерации углеводородов и оценка их роли в формировании залежей доюрского комплекса Западной Сибири. *Георесурсы*, 24(3): 17–48. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.3.3>

12. Конторович В.А. **2002.** *Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири.* Новосибирск: Изд-во СО РАН, 253 с.
13. Исаев В.И., Искоркина А.А., Лобова Г.А., Старостенко В.И., Тихоцкий С.А., Фомин А.Н. **2018.** Мезозойско-кайнозойский климат и неотектонические события как факторы реконструкции термической истории нефтематеринской баженовской свиты арктического региона Западной Сибири (на примере п-ва Ямал). *Физика Земли*, 2: 124–144.
14. Исаев В.И., Искоркина А.А., Лобова Г.А., Фомин А.Н. **2016.** Палеоклиматические факторы реконструкции термической истории баженовской и тогурской свит юго-востока Западной Сибири. *Геологический журнал*, 38(4): 3–25. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i4.2016.107798>; EDN: ZMIZUJ
15. Scotese C. **2016.** A new global temperature curve for the Phanerozoic. *GSA Annual Meeting Denver, Colorado, Abstracts with Programs*, 48(7): 74–31. <https://doi.org/10.1130/abs/2016am-287167>
16. Краснов В.И. (ред.) **1999.** *Решения межведомственного совещания по рассмотрению и принятию региональной стратиграфической схемы палеозойских образований Западно-Сибирской равнины.* Новосибирск, 80 с. URL: <https://www.vsegei.ru/ru/info/stratigraphy/regional/WestSib.php>
17. Ярославцева Е.С., Бурштейн Л.М. **2022.** Моделирование истории генерации углеводородов в куонамской свите Курейской синеклизы. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, 17(4): 1–18. http://www.ngtp.ru/rub/2022/38_2022.html
18. Добрецов Н.Л. **2005.** Крупнейшие магматические провинции Азии (250 млн лет): Сибирские и Эмейшаньские траппы (платобазальты) и ассоциирующие гранитоиды. *Геология и геофизика*, 46(9): 870–890. EDN: MUMTMT
19. Bagdasaryan T.E., Thomson S.N., Latyshev A.V., Veselovskiy R.V., Zaitsev V.A., Marfin A.E., Zakharov V.S., Yudin D.S. **2022.** Thermal history of the Siberian Traps Large Igneous Province revealed by new thermochronology data from intrusions. *Tectonophysics*, 836: 229385. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229385>
20. Ivanov A.V., Corfu F., Kamenetsky V.S., Marfin A.E., Vladykin N.V. **2021.** ²⁰⁷Pb-excess in carbonatitic baddeleyite as the result of Pa scavenging from the melt. *Geochemical Perspectives Letters*, 18: 11–15. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.2117>
21. Isaev V.I., Fomin A.N. **2006.** Loci of generation of Bazhenov- and Togur-type oils in the southern Nyuroi'ka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 47(6): 734–745.
22. Хант Дж. **1982.** *Геохимия и геология нефти и газа.* М.: Мир, 704 с.
23. Ступакова А.В., Соколов А.В., Соболева Е.В., Кирюхина Т.А., Курасов И.А., Бордюг Е.В. **2015.** Геологическое изучение и нефтегазоносность палеозойских отложений Западной Сибири. *Георесурсы*, 61(2): 63–76. <https://doi.org/10.18599/grs.61.2.6>
24. Бордюг Е.В. **2011.** Генетические типы нефтей на юго-востоке Западно-Сибирского нефтегазонального бассейна. *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*, 6: 64–67. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geneticheskie-tipy-neftey-na-yugo-vostoke-zapadno-sibirskogo-neftegazonosnogo-basseyina>

References

1. Zhilina I.V., Utoplennikov V.K. **2018.** Resource base of hydrocarbon raw material of Volga-Ural and Timan-Pechora oil and gas provinces, prospects of its replenishment. *Actual Problems of Oil and Gas*, 3(22): 1–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art5>; http://oilgasjournal.ru/issue_22/zhilina.pdf
2. Liu X., Jin Z., Bai G., Liu J., Guan M., Pan Q., Li T. **2017.** A comparative study of salient petroleum features of the Proterozoic–Lower Paleozoic succession in major petroliferous basins in the world. *Energy Exploration & Exploitation*, 35(1): 54–74. <https://doi.org/10.1177/0144598716680308>
3. Li D., Chang J., Qiu N., Wang J., Zhang M., Wu X., Han J., Li H., Ma A. **2022.** The thermal history in sedimentary basins: A case study of the central Tarim Basin, Western China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 229: 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2022.105149>
4. Zhu G., Milkov A.V., Li J., Xue N., Chen Y., Hu J., Li T., Zhang Z., Chen Z. **2021.** Deepest oil in Asia: Characteristics of petroleum system in the Tarim basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 199: 108246. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108246>
5. Zapivalov N.P., Isaev G.D. **2010.** Criteria of estimation of oil-and-gas-bearing Palaeozoic deposits of Western Siberia. *Tomsk State University Journal*, 341: 226–232. (In Russ.).
6. Vyshemirskiy V.S., Zapivalov N.P., Badmaeva Zh.O., Benenson V.A., Doil'nicyn E.F., Dubatolov V.N., Zinger A.S., Kunin N.Ya., Moskovskaya V.I., Perceva A.P. et al. **1984.** [Organic geochemistry of the Paleozoic in the south of the Western Siberian Plate]. Novosibirsk: Nauka, 192 p. (In Russ.).
7. Kontorovich A.E., Nesterov I.I., Salmanov F.K., Surkov V.S., Trofimuk A.A., Erv'e Yu.G. **1975.** [Oil and gas geology in Western Siberia]. Moscow: Nedra, 680 p. (In Russ.).
8. Surkov V.S., Zhero O.G. **1981.** [The basement and platform development of the Western Siberian Plate]. Moscow: Nedra, 143 p. (In Russ.).
9. Ablya E., Nadezhkin D., Bordyug E., Korneva T., Kodlaeva E., Mukhutdinov R., Sugden M.A., Van Bergen P.F. **2008.** Paleozoic-sourced petroleum systems of the Western Siberian Basin – what is the evidence? *Organic Geochemistry*, 39(8): 1176–1184. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2008.04.008>

10. Korzhov Yu.V., Isaev V.I., Kuzina M.Ya., Lobova G.A. **2013**. Genesis of the pre-Jurassic oil deposits of the Rogozhnikov group of fields (based on results of vertical alkanes zoning studying). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 323(1): 51–56. (In Russ.). EDN: RAFBJH
11. Isaev V.I., Galieva M.F., Lobova G., Kuzmenkov S.G., Starostenko V.I., Fomin A.N. **2022**. Paleozoic and Mesozoic hydrocarbon foci of generation and assessment of their role in formation oil deposits of the Pre-Jurassic complex of Western Siberia. *Georesursy = Georesources*, 24(3): 17–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.18599/grs.2022.3.3>
12. Kontorovich V.A. **2002**. [Tectonics and oil and gas potential of the Mesozoic and Cenozoic rocks in the south-eastern part of Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 253 p. (In Russ.).
13. Isaev V.I., Iskorkina A.A., Lobova G.A., Starostenko V.I., Tikhotskii S.A., Fomin A.N. **2018**. Mesozoic-Cenozoic climate and neotectonic events as factors in reconstructing the thermal history of the source-rock bazhenov formation, Arctic Region, West Siberia, by the example of the Yamal Peninsula. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 54(2): 310–329. <https://doi.org/10.1134/s1069351318020064>
14. Isaev V.I., Iskorkina A.A., Lobova G.A., Fomin A.N. **2016**. Paleoclimatic factors of reconstruction of thermal history of parent petroleum bazhenov and togur suites of southeast of West Siberia. *Geofizicheskiy zhurnal*, 38(4): 3–25. (In Russ.). EDN: ZMIZUJ
15. Scotese Ch. **2016**. A new global temperature curve for the Phanerozoic. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 48(7): 74–31. <https://doi.org/10.1130/abs/2016am-287167>
16. Krasnov V.I. (ed.) **1999**. [Decisions of the interdepartmental meeting to review and adopt the regional stratigraphic chart of the Paleozoic formations of the West Siberian Plain]. Novosibirsk, 80 p. (In Russ.). URL: <https://www.vsegei.ru/ru/info/stratigraphy/regional/WestSib.php>
17. Yaroslavtseva E.S., Burshteyn L.M. **2022**. Modelling of hydrocarbon generation history in Kuonamka formation of Kureyka syncline. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 17(4): 1–18. URL: http://www.ngtp.ru/rub/2022/38_2022.html (In Russ.).
18. Dobretsov N.L. **2005**. 250 Ma large igneous provinces of Asia: Siberian and Emeishan traps (plateau basalts) and associated granitoids. *Russian Geology and Geophysics*, 46(9): 847–868. URL: https://sibran.ru/en/journals/issue.php?ID=120401&ARTICLE_ID=125655
19. Bagdasaryan T.E., Thomson S.N., Latyshev A.V., Veselovskiy R.V., Zaitsev V.A., Marfin A.E., Zakharov V.S., Yudin D.S. **2022**. Thermal history of the Siberian Traps Large Igneous Province revealed by new thermochronology data from intrusions. *Tectonophysics*, 836: 229385. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229385>
20. Ivanov A.V., Corfu F., Kamenetsky V.S., Marfin A.E., Vladyskin N.V. **2021**. ²⁰⁷Pb-excess in carbonatitic baddeleyite as the result of Pa scavenging from the melt. *Geochemical Perspectives Letters*, 18: 11–15. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.2117>
21. Isaev V.I., Fomin A.N. **2006**. Loci of generation of Bazhenov- and Togur-Type oils in the southern Nyurol'ka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 47(6): 731–743.
22. Hunt J.M. **1982**. [Petroleum geochemistry and geology]. Moscow: Mir, 704 p. (In Russ.).
23. Stoupakova A.V., Sokolov A.V., Soboleva E.V., Kiryukhina T.A., Kurasov I.A., Bordyug E.V. **2015**. Geological survey and petroleum potential of Paleozoic deposits in the Western Siberia. *Georesursy = Georesources*, 61(2): 63–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.18599/grs.61.2.6>
24. Bordyug E.V. **2011**. Genetic types of oils of south-eastern part of West Siberian basin. *Moscow University Geology Bulletin*, 66(6): 442–445. <https://doi.org/10.3103/s0145875211060032>

Об авторах

Крутенко Маргарита Фаритовна (<https://orcid.org/0009-0009-0278-2513>), аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, margaritagalieva@gmail.com

Исаев Валерий Иванович (<https://orcid.org/0000-0002-3545-9810>), доктор геолого-минералогических наук, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

Лобова Галина (<https://orcid.org/0000-0002-5744-2171>), доктор геолого-минералогических наук, независимый эксперт, Висагинас, Литва, lobovaga52@gmail.com

About the Authors

Krutenko, Margarita F. (<https://orcid.org/0009-0009-0278-2513>), Postgraduate at the Department of Geology, School of Earth Sciences & Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, margaritagalieva@gmail.com

Isaev, Valery I. (<https://orcid.org/0000-0002-3545-9810>), Doctor of Geology and Mineralogy, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk

Lobova, Galina (<https://orcid.org/0000-0002-5744-2171>), Doctor of Geology and Mineralogy, Independent expert, Visaginas, Lithuania, lobovaga52@gmail.com

Поступила 24.07.2023

Принята к публикации 25.08.2023

Received 24 July 2023

Accepted 25 August 2023

© Авторы 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

ОБЗОР

УДК 550.84

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.264-275>
<https://www.elibrary.ru/pkglclg>

Комплексные геолого-геофизические исследования по обоснованию внешней границы континентального шельфа России в Охотском и Восточно-Сибирском морях (2006–2009 гг.): обзор*

Р. Б. Шакиров[@], Е. В. Мальцева[@], А. Л. Веникова, Н. Л. Соколова, А. И. Гресов

[@] E-mail: ren@poi.dvo.ru; ekor@poi.dvo.ru

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

Резюме. В работе обсуждаются результаты комплексных геолого-геофизических исследований глубинного строения морского дна по профилям «Магадан – Южные Курилы» (2-ДВ-М), «Шантарские острова – Северные Курилы» (1-ОМ) и «Мыс Биллингса – внешняя граница континентального шельфа» (5-АР), выполненных в 2006–2009 гг. в рамках государственной программы экспедиционных работ по обоснованию суверенного права Российской Федерации на континентальный шельф в Охотском и Восточно-Сибирском морях. Головной организацией, осуществлявшей руководство экспедиционными работами, было ФГУНПП «Севморгео», а основными исполнителями – сотрудники Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН. Особый акцент в статье сделан на газогеохимических исследованиях, целью которых являлось установление региональных фоновых и аномальных полей для оценки перспектив поисков нефти, газа и газогидратов. В результате комплексных геолого-геофизических экспедиций под руководством А.А. Мережки (Севморгео) в Охотском море установлено, что анклав за пределами 200-мильной зоны в центральной части акватории по геологическому строению не отличается от сопредельных с ней частей и является естественным продолжением обрамляющих геологических структур фундамента. Доказательства, полученные на основе изучения данных этих экспедиций, стали достаточными для успешного обоснования заявки в ООН. 11 марта 2014 г., после тщательного рассмотрения заявки и проектов рекомендаций, анклав международных вод в Охотском море был юридически закреплён за Российской Федерацией. Исследования в Восточно-Сибирском море позволили получить огромный фактический материал по литологии, геохимии и газовому потенциалу донных отложений этого района.

Ключевые слова: Охотское море, Восточно-Сибирское море, континентальный шельф, анклав, геолого-геофизические исследования, метан

Complex geological and geophysical studies on substantiation of the outer limits of the Russian continental shelf in the Sea of Okhotsk and East Siberian Sea (2006–2009): Review*

Renat B. Shakirov[@], Elena V. Maltseva[@], Anna L. Venikova, Natalia L. Sokolova, Alexandr I. Gresov

[@] E-mail: ren@poi.dvo.ru; ekor@poi.dvo.ru

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. The paper discusses the results of complex geological and geophysical studies of the deep structure of the seabed along the profiles “Magadan – Southern Kurils” (2-DV-M), “Shantar Islands – Northern Kurils” (1-OM) and “Cape Billings – Outer Continental Shelf Limits” (5-AR), carried out in 2006–2009 within the framework of the State program of expeditionary works on substantiation of national sovereignty over the continental shelf in the Sea of Ok-

* Полный текст данной статьи на английском языке размещен на сайте журнала [The full text of this article in English can be found on the website of the «Geosystems of Transition Zones» journal]: <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2023-3-3.pdf>

hotsk and East Siberian Sea. Federal State Unitary Scientific and Production Company Sevmorgeo was parent organization which managed the expeditionary works; the main executors were the staff of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of FEB RAS. A special role was assigned to gas-geochemical studies with the purpose to establish regional background and anomalous gas fields to assess prospects for oil, gas and gas hydrates. As a result of complex geological and geophysical expeditions led by A.A. Merezko (Sevmorgeo) in the Sea of Okhotsk, it was established that the enclave outside the 200-mile zone in the central part of the water area does not differ in geological structure from the adjacent parts and is a natural continuation of the framing geological structures of the basement. The evidence obtained was sufficient to successfully justify the application to the UN. On March 11, 2014, after careful consideration of the application and draft recommendations, the enclave of international waters in the Sea of Okhotsk was legally assigned to the Russian Federation. Studies in the East Siberian Sea have provided a huge amount of data on lithology, geochemistry and gas potential of bottom sediments in this area.

Keywords: Sea of Okhotsk, East Siberian Sea, continental shelf, enclave, geological and geophysical research, methane

Благодарности и финансирование

Авторы выражают благодарность коллегам из отдела геологии и геофизики ТОИ ДВО РАН, а также сотрудникам ФГУНПП «Севморгео» за совместную работу.

Исследования выполнены в рамках госзадания Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН (№ 121021500055-0).

Для цитирования: Шакиров Р.Б., Мальцева Е.В., Веникова А.Л., Соколова Н.Л., Гресов А.И. Комплексные геолого-геофизические исследования по обоснованию внешней границы континентального шельфа России в Охотском и Восточно-Сибирском морях (2006–2009 гг.): обзор. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 3, с. 264–275. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.264-275>; <https://www.elibrary.ru/pkglclg>

Acknowledgements and funding

The authors would like to express their gratitude to their colleagues from the Department of Geology and Geophysics of POI FEB RAS, as well as to the staff of FSUSPC Sevmorgeo for collaborative work.

The research was carried out within the framework of the state project of V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS (no. 121021500055-0).

For citation: Shakirov R.B., Maltseva E.V., Venikova A.L., Sokolova N.L., Gresov A.I. Complex geological and geophysical studies on substantiation of the outer limits of the Russian continental shelf in the Sea of Okhotsk and East Siberian Sea (2006–2009): Review. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 264–275. (In Russ. & in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.264-275>; <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2023-3-3.pdf>

Введение

Значение тихоокеанских и арктических региональных исследований в пределах нашей страны огромно, и интерес к ним продолжает возрастать с каждым годом. Дальний Восток, как и Арктический сегмент, обладает огромной ресурсной базой, особенно в исключительной экономической зоне и на континентальном шельфе.

Российская Федерация (тогда еще как СССР) подписала Конвенцию ООН по морскому праву 1982 г. (далее Конвенция) 10 декабря 1982 г. и ратифицировала ее 26 февраля 1997 г. Конвенция вступила в силу для Российской Федерации 11 апреля 1997 г.

В 2001 г. Россия первой из государств подала Представление в Комиссию по границам континентального шельфа относительно внешней границы континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом и Тихом океанах на основании п. 8 ст. 76 Конвенции. В нем были представлены геолого-геофизические и батиметрические материалы, показывающие принадлежность к континен-

тальной окраине Евразии участка акватории Охотского моря, расположенного за пределами 200-мильной экономической зоны России.

В центре Охотского моря находится анклав вытянутой формы и значительной площади, ранее известный в иностранной литературе как the Sea of Okhotsk Peanut Hole (рис. 1). Этот анклав считался открытым для судоходства и добычи биологических ресурсов любыми государствами. Правительством РФ было принято решение о проведении специальных экспедиционных работ с целью подачи соответствующей заявки в Комиссию ООН по границам континентального шельфа.

В этих работах государственным заданием устанавливались особые требования к режиму плавания, судну, качеству и объему исследований. Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (ТОИ ДВО РАН) обладал необходимыми специалистами, оборудованием и опытом, а НИС «Академик М.А. Лаврентьев» полностью соответствовало всем требованиям к судну. В связи с этим в период 2006–2009 гг. было организова-

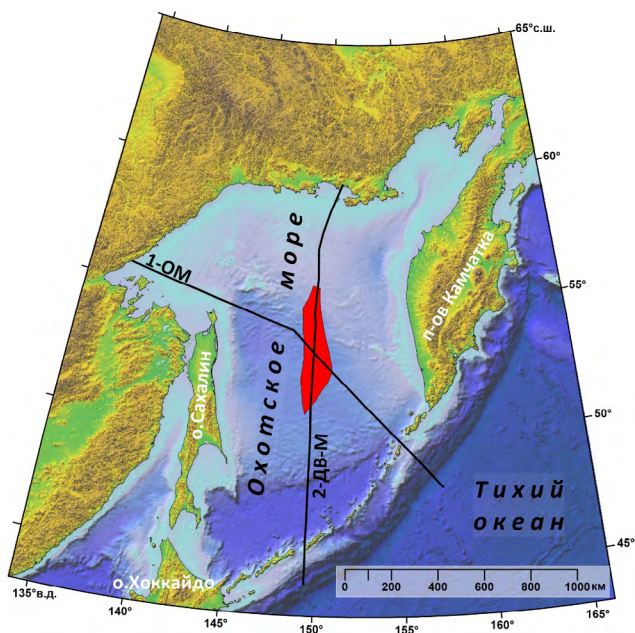


Рис. 1. Анклав в центральной части Охотского моря (до 2013 г.) с опорными профилями 2-ДВ-М и 1-ОМ, выполненными в экспедициях 2006–2009 гг.

Fig. 1. Enclave in the central part of the Sea of Okhotsk (until 2013) with the 2-DV-M and 1-OM calibration profiles made during the expeditions of 2006–2009.

но пять комплексных экспедиций, в которых в рейсах разных лет приняли участие 64 сотрудника ТОИ ДВО РАН и сотрудники ФГУНПП «Севморгео». Все экспедиции проведены на НИС «Академик М.А. Лаврентьев». Рейсы 41, 42-1, 42-2, 45 и 48 выполнены в Охотском море (профили 2-ДВ-М и 1-ОМ). В 45 рейсе (рис. 2) на втором этапе выполнялись работы в Восточно-Сибирском море на профиле 5-АР. Руководили этими экспедициями со стороны ТОИ ДВО РАН д.г.-м.н. Р.Г. Кулинич, к.г.-м.н. Б.Я. Карп и к.г.-м.н. Р.Б. Шакиров, а со стороны Севморгео А.А. Мережко и А.Д. Краснюк. Капитанами во время проведения этих экспедиций были В.И. Иванов и В.Н. Никифоров.

В 2007–2009 гг. на профилях 2-ДВ-М, 1-ОМ и 5-АР выполнен основной объем глубинного сейсмического зондирования, непрерывного высокочастотного сейсмического профилирования, литологического опробования донных отложений, попутно выполнены газогеохимические, геохимические, палеостратиграфические, гидрохимические и др. работы.



Рис. 2. Научный состав и экипаж экспедиции в 45-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2008 г. Восточно-Сибирское море, Северный Ледовитый океан. Все фото в статье из архива Р.Б. Шакирова

Fig. 2. Scientific membership and crew of the expedition in the 45th voyage of the research vessel “Akademik M.A. Lavrentyev”, 2008, the East Siberian Sea, the Arctic Ocean. All photos in the article are from R.B. Shakirov archive.

Наиболее сложной задачей являлось изучение глубинного строения земной коры, здесь получены данные самого высокого качества для их уверенной интерпретации в государственных целях.

Цель данной статьи – показать, какие основные экспедиционные результаты послужили базой для обоснования национального суверенного права на континентальный шельф в Охотском и Восточно-Сибирском морях.

Методы исследования и средства измерений

Всего по программе внешней границы континентального шельфа совместно Севморгео и ТОИ ДВО РАН было отработано в Охотском море два региональных геотраверса: 2-ДВ-М (2006–2007 гг.) и 1-ОМ (2008–2009 гг.) [1] (рис. 1), и в Восточно-Сибирском море профиль 5-АР (2008 г.) [2] (рис. 3).

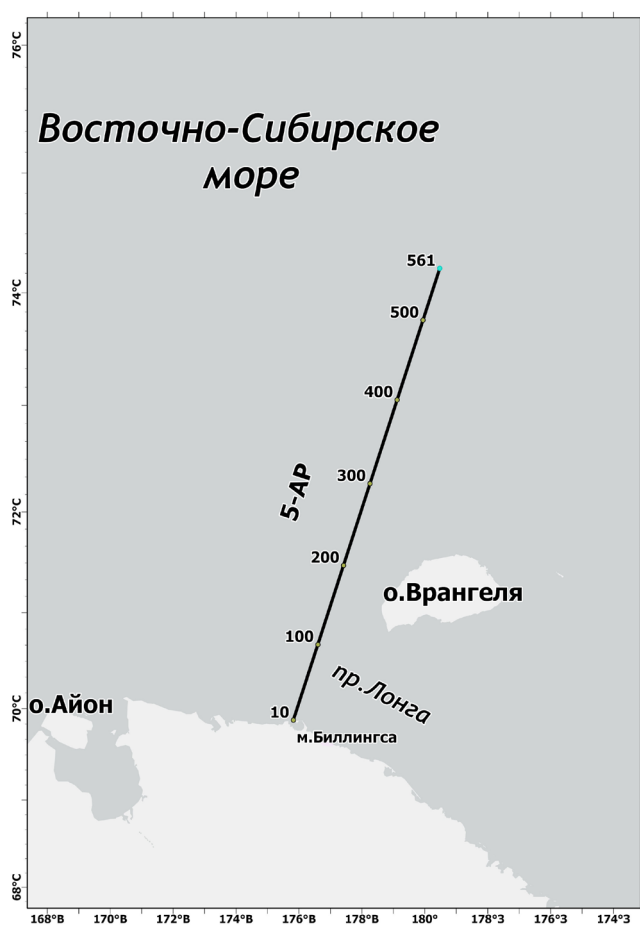


Рис. 3. Схема расположения профиля 5-АР в Восточно-Сибирском море (2008 г.).

Fig. 3. Layout of the 5-AR profile in the East Siberian Sea (2008).

В соответствии с рекомендациями Комиссии ООН (2002 г.), в 2006 г. были начаты совместные работы «Севморгео» и ТОИ ДВО РАН (рейс 41, НИС «Академик М.А. Лаврентьев», руководитель экспедиции д.г.-м.н. Р.Г. Кулинич) на меридиональном профиле 2-ДВ-М протяженностью около 1000 км, пересекающем акваторию Охотского моря на геотраверсе «Магадан – Южные Курилы». В районе анклава были проведены батиметрические наблюдения и выполнен комплекс геолого-геофизических исследований, включавший глубинное сейсмическое зондирование, высокоразрешающее сейсмическое профилирование, геологическое опробование дна в полосе профиля. Также на профиле 2-ДВ-М в 2006–2007 гг. выполнялись сейсмические работы методом отраженных волн под руководством Севморгео.

Для проведения работ использовалось оборудование в основном отечественного производства.

Для глубинных сейсморазведочных работ, измерения глубин и детального исследования рельефа дна на профилях, для поисков и визуального изучения газовых источников, выявления газосодержащих структур, изучения вещественного состава осадков, определения концентрации газов в воде и осадках использованы следующие приборы:

- автономные донные сейсмические станции (АДСС);
- стационарный судовой глубоководный эхолот ELAC ENIF-LAZ 72;
- гидроакустический комплекс, состоящий из модернизированных судовых эхолотов САРГАН-ЭМ и ELAC, 2 гидролокаторов САРГАН-ГМ;
- геофизический комплекс «Sonic 3M»;
- навигационный приемоиндикатор GPS 120 GARMIN для определения местонахождения судна;
- газовый хроматограф «КристалЛюкс-4000М»;
- гидрологический CTD-зонд SBE-9 и 12-позиционная батометрическая система Rosette (США);
- опускаемая на тросе в дрейфе судна гидростатическая трубка для отбора проб донных осадков и другое оборудование.



Рис. 4. Общий вид самовсплывающей АДСС, подготовленной к постановке.

Fig. 4. General view of the self-floating ABSS prepared to installation.

Сейсмические работы методом глубинного сейсмического зондирования

Наблюдения выполнялись с использованием автономных донных сейсмостанций АДСС с регистраторами SM-26 и бортовых устройств управления и позиционирования (GPS). Прием сигналов осуществлялся на трехкомпонентные сейсмоприемники GS-20 и гидрофоны. Для возбуждения сейсмических импульсов применялись отечественные пневмоизлучатели СИН-6М со сменными рабочими объемами 80 и 120 л. [2].

Проведение глубинных сейсморазведочных работ с автономными донными сейсмическими станциями состоит из трех последовательных технологических циклов: постановка донных станций, отработка линии возбуждения с помощью пневматических источников упругих волн, подъем донных станций и экспресс-оценка сейсмического материала.

К сожалению, в настоящее время методы глубинного сейсмического зондирования в нашей стране развиваются слабо. А работы с помощью пневматических источников для проведения научными организациями фундаментальных исследований вообще запрещены. Эта ситуация требует срочного решения, так как в современной обстановке экспедиционные работы по расширению границ отечественного шельфа как никогда актуальны.

Расстановка АДСС проводилась по линии профиля с интервалом между станциями (шаг расстановки) в среднем 10 км. Для работ использовались главным образом так называемые самовсплывающие АДСС. Корпус станции имеет положительную плавучесть и погружается на дно под действием железобетонного балласта. По окончании работ по команде, передаваемой по гидроакустическому каналу, станция освобождается от балласта и всплывает на поверхность. Внешний вид АДСС в снаряженном виде показан на рис. 4. Масса конструкции с балластом порядка 100 кг (в том числе балласт – 60 кг).



Рис. 5. Подготовка к работе пневмоисточника СИН-6М с камерой 80 л.

Fig. 5. Pre-operation procedures for the SIN-6M air-gun with a 80 liter chamber.

Отработка линии возбуждения производилась этим же судном по линии профиля с «забегом» от места постановки крайней станции на удаление 150 км. Для возбуждения упругих волн использовался одиночный низкочастотный пневмоисточник (ПИ) СИН-6М с объемом камеры 80–120 л. (рис. 5). ПИ буксировался за кормой судна на удалении 70–100 м и заглублении на глубину 37.5 м. Вес ПИ – 1080 кг. Отработка линии возбуждения велась на малом ходу судна порядка 4 узла. «Стрельба» по времени, выстрел через 2 мин. Соответственно, в плане интервал между выстрелами (шаг возбуждения) составлял 250 м.

Пневмоизлучатель непрерывно обеспечивался сжатым воздухом посредством мобильной компрессорной лаборатории, выполненной на базе стандартного 20-футового контейнера.

После отработки линии возбуждения АДСС поднимали, на борту судна считывали информацию и подготавливали аппаратуру к дальнейшей работе.

Литологические исследования

Для литологического опробования поверхностных осадков морского дна использовали пробоотборники следующих типов:

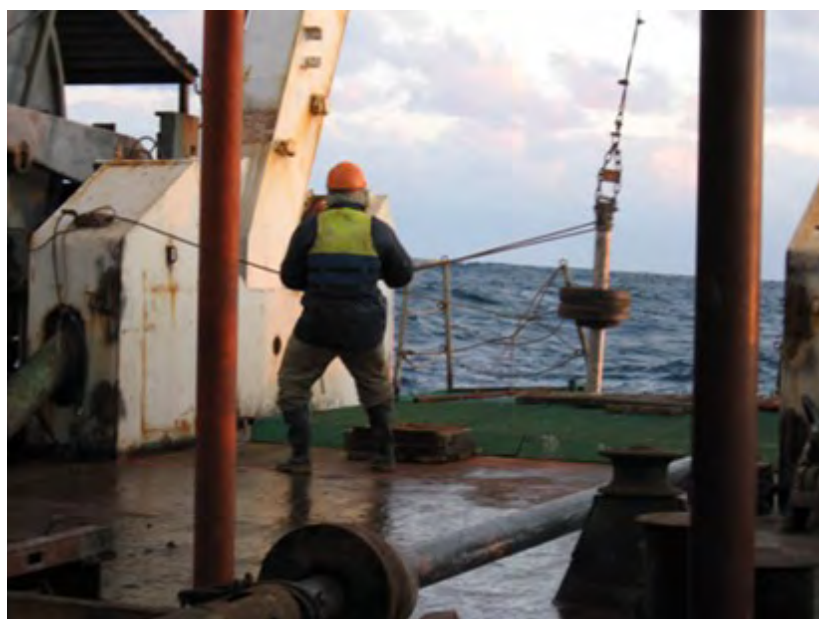


Рис. 6. Спуск гидростатического пробоотборника (42-й рейс НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2007 г.).

Fig. 6. Launch of the hydrostatic sampler (the 42th voyage of the research vessel “Akademik M.A. Lavrentyev”, 2007).

- простая ударная прямоточная трубка без вкладышей длиной 3 м и с внутренним диаметром 6 см;
- ударная прямоточная трубка «большого диаметра» с вкладышами длиной 4 м и с внутренним диаметром 9 см;
- гидростатический пробоотборник (рис. 6) с вкладышами конструкции Ю.Л. Гаранько (1978 г., ТОИ ДВО РАН), длиной 5.5 м и с внутренним диаметром 12 см;
- дночерпатель «Океан-2».

Предварительно, по сейсмическим данным, определялся характер залегания осадочных отложений. Далее, по данным эхолотного промера и сейсмического профилирования, определялось заложение станций и выполнялся отбор осадочного материала. Для быстроты извлечения осадка из трубки использовался полиэтиленовый вкладыш, разрезанный вдоль на две секции. Отобранный керн перемещался в судовую лабораторию, проходил литологическое описание и представлялся для последующего газогеохимического анализа. Литологическое изучение донных осадков выполнялось в основном лабораторией седиментологии и стратиграфии ТОИ ДВО РАН.

Газогеохимические исследования

Методика газогеохимических исследований закреплена в Паспорте лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН (ПС 1.051-21) и утверждена Заключением № 58, выданным ФБУ «Приморский ЦСМ», а также отражена в патентах и публикациях [3–5].

Дискретность отбора проб по керну составляла 0.15–0.30 м, со сгущением отбора газогеохимических проб в зонах максимальной литолого-структурной изменчивости до 0.05–0.10 м.

Отбор осадка в склянки 70 мл, заполненные солевым раствором примерно на 2/3 (не более 50 мл), производился шприцем 10 мл с обрезанным носиком. Отбиралось не менее 10 мл осадка. Затем склянка заполнялась солевым раствором доверху, закрывалась резиновой пробкой с использованием иголки, чтобы удалить

оставшийся воздух. Шприцем из закрытой склянки отбиралось 12 мл солевого раствора, при этом через вторую иглу впускался воздух. Склянки помещались в ультразвуковую ванну на 5 мин при максимальной мощности, затем интенсивно периодически встряхивались в течение 2–3 ч. Интервал времени между отбором проб осадка и газохроматографическим анализом составлял 2.5–3.5 ч.

Газовые компоненты (азот, кислород, углекислый газ, метан и другие углеводородные газы) в пробах осадка определяли на борту судна, на хроматографе «КристалЛюкс-4000М» (Россия) (рис. 7). Модуль хроматографа имеет три детектора: два – по теплопроводности (ДТП) и один – пламенно-ионизационный (ДИП). Для калибровки прибора применялись сертифицированные поверочные газовые смеси. Погрешность измерений составляет 5 % [6].

Результаты исследования

Охотское море по геологическому строению и ресурсному потенциалу занимает особое положение среди окраинных морей континентальной окраины Азиатского материка. Оно глубоко вдается в пределы континента и характеризуется обширным переуглубленным шельфом.

Ранее, в результате исследований ТОИ ДВО РАН под руководством Е.П. Леликова [7], было установлено, что в составе фундамента Охотского моря широко распространены раз-

личные типы гранитоидов – основное свидетельство континентальной природы происхождения бассейна. Гранитоиды драгированы на всех подводных возвышенностях Охотского моря [7]. Породы фундамента на акватории Охотского моря подняты на многочисленных станциях, на возвышенностях и банках, в том числе в пределах Центрально-Охотоморского свода [8]. Определено, что в его геологическом строении участвуют метаморфические, магматические и осадочные породы палеозойско-мезозойского возраста, относящиеся по геохимической специализации к известково-щелочной каликатровой серии тихоокеанского типа. Рентгеноструктурное исследование глинистых фракций показало, что основным источником их поступления в донные отложения могут быть только континентальные коры выветривания, что может, согласно выводам специалистов ФГБУ «ВНИИОкеангеология», свидетельствовать о существовании в недавнем прошлом в районе Центрально-Охотоморского свода ряда островов или целого архипелага. С геоморфологических позиций северная и центральная части площади акватории Охотского моря интерпретированы как переуглубленный шельф, а по итогам комплексных работ показано, что анклав располагается внутри Охотоморской континентальной окраины.

В ходе обработки данных ВНИИОкеангеологии в Севморгео с участием ТОИ ДВО РАН (В.Г. Прокудин) выявлено в частности, что строение земной коры в Курильской (Южно-Охотская) котловине и в пределах Центрально-Охотоморского свода сильно различается, и определены основные характеристики этого различия.

Непосредственно на профиле 2-ДВ-М (работы 2006–2007 гг.) под руководством и в основном силами ТОИ ДВО РАН совместно с Севморгео поднят 201 керн донных отложений (гравитационный пробоотборник) и выполнено 9 станций драгирования коренных пород в местах их выходов на поверхность дна. Петрографическими исследованиями установлены три типа пород – метаморфические, изверженные (вулканические и интрузивные) и осадочные. В 2008–2009 гг. эти работы дополнены аналогичным комплексом исследований на профиле 1-ОМ (Шантарские острова – северные Курилы): более 150 спуско-подъемов гео-



Рис. 7. Хроматограф «КристалЛюкс-4000М» (42-й рейс НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2007 г.)

Fig. 7. Crystallux-4000M chromatograph (the 42th voyage of the research vessel "Akademik M.A. Lavrentyev", 2007).

логических трубок. Во время литологического опробования работы выполнялись круглосуточно (три вахты по 8 ч каждая), отрабатывалось до 20 станций отбора донных отложений в сутки. На региональных профилях 2-ДВ-М, 1-ОМ и 5-АР отработано 417 пикетов опробования по результатам предварительной интерпретации сейсмоакустического профилирования [9]. Составлен представительный каталог литологического описания донных осадков отобранных проб.

По особенностям литологического состава на разрезе Магадан – Курилы – Тихий океан были выделены следующие участки: 1 – Северо-Охотоморский с глубинами 60–250 м; 2 – Центрально-Охотоморский с глубинами 250–1700 м; 3 – приуроченный к северному борту Курильской котловины и ее ложу с глубинами 1700–3360 м; 4 – занимающий южный борт Курильской котловины с глубинами 3360–1600 м; 5 – океанический с глубинами 400–800 м.

Северо-Охотоморский и Центрально-Охотоморский участки представлены в целом однообразным набором осадочных слоев, состоящих из мелкоалеврито-пелитовой основы (преобладающей в составе) и крупноалеврито-псаммитовой (песчаной) примеси.

Курильская котловина представлена тонкими кремнистыми пелитовыми осадками.

На океаническом участке опробован только самый верхний поверхностный слой. Он представлен песком (от крупно- до мелкозернистого с примесью мелкой дресвы и гравия), состоящим из черного вулканического шлака, черных базальтоидных выветрелых пород, желто-серого туфопесчаника и белых кристаллов полевого шпата.

В результате выполнения газогеохимической съемки на профиле 2-ДВ-М (2007 г.) была определена региональная фоновая концентрация метана (региональный фон) в осадке по профилю, которая составила 3 ppm ($3 \text{ см}^3/\text{м}^3$), выделено 5 новых зон с аномальными концентрациями метана (до 1230 мкл/л) [9]. В центральной глубоководной области Охотского моря в осадках формируются, главным образом, фоновые поля концентраций метана. На этом фоне выделяются аномалии метана, обнаруживаемые в зонах структурных выступов, где могут, в том числе за счет оползневых

явлений, формироваться относительно мощные линзы осадочного материала. В этих телах по аналогии с другими газоносными участками высокопродуктивного Охотского моря могут идти масштабные процессы генерации газообразных углеводородов (рис. 8).

На профиле 1-ОМ (2008 г.) были установлены максимальные содержания метана в донных отложениях Восточно-Сахалинского склона до 35 752 мкл/л (станция LV-45-465A) (рис. 8). Данная зона целиком располагается в пределах Дерюгинского прогиба (или Дерюгинской котловины). При участии лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН в осадках данного участка многократно были обнаружены газогидраты (южнее профиля 1-ОМ). В 2008–2009 гг. на профиле 1-ОМ гидратов метана обнаружено не было, что, возможно, указывает на северную границу их распространения в прогибе. Однако зафиксированные концентрации метана одновременно отмечают наличие локальных зон свободного выхода природного газа, где при благоприятных Р–Т-условиях образование газогидратов возможно. Минимальные содержания метана в донных отложениях около 0.2 мкл/л определены в осадках Шантарского грабена. В 2009 г. повышенные концентрации метана до 87 мкл/л были установлены в северо-восточной части впадины Дерюгина и на склоне Курильской котловины протяженностью около 30 км (рис. 8).

В процессе газогеохимических работ в донных отложениях подтверждена общая закономерность увеличения концентраций метана с глубиной опробования. Обнаруженные аномальные концентрации метана приурочены, как правило, к горизонтам 90 см и ниже по керну осадка. Согласно изотопным исследованиям, обнаружены углеводородные газы всех генезисных типов: от микробиальных до магматогенных.

Как основной результат комплексных геолого-геофизических экспедиционных работ в Охотском море установлено, что анклав за пределами 200-мильной зоны в центральной части акватории по геологическому строению не отличается от сопредельных с ней частей и является естественным продолжением обрамляющих геологических структур фундамента. Присутствие рассматриваемых комплексов и гранитоидов в пределах участка подтверди-

лось результатами геологического опробования непосредственно на профиле 2-ДВ-М.

Доказательства, полученные на основе изучения данных этих экспедиций, стали достаточными для успешного обоснования заявки в ООН.

11 марта 2014 г., после тщательного рассмотрения заявки и проектов рекомендаций, анклав международных вод в Охотском море был юридически закреплен за Российской Федерацией. В соответствии с п. 8 ст. 76 Конвенции ООН по морскому праву 1982 г., границы континентального шельфа России в Охотском море являются окончательными и обязательными для всех государств. Постановлением Правительства РФ от 15 августа 2015 г. № 845 «О континентальном шельфе Российской Федерации в Охотском

море» установлено, что морское дно и недра подводного района (анклава), расположенного в центральной части Охотского моря, являются континентальным шельфом Российской Федерации. В результате континентальный шельф России в Охотском море увеличился на 56 400 км², а лакомый для иностранцев участок the Sea of Okhotsk Peanut Hole, который, по их мнению, имел форму арахиса (англ. peanut – арахис), перестал существовать.

Государственные работы для обоснования суверенитета внешнего континентального шельфа РФ в Арктическом регионе продолжаются и в ряде акваторий достигли определенного успеха.

В 2008 г. на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (рейс 45) Севморгео и ТОИ ДВО РАН

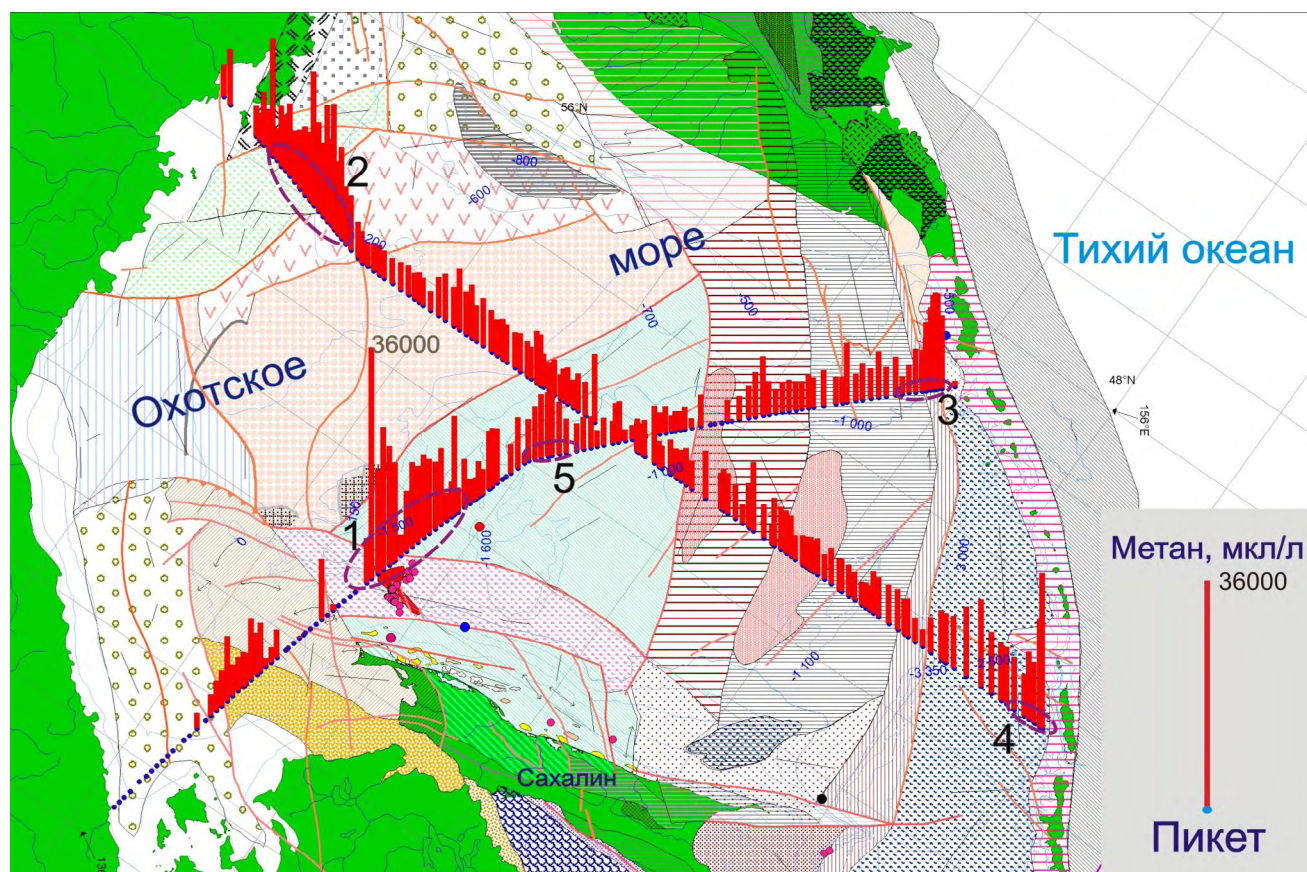


Рис. 8. Распределение CH₄ (столбчатые диаграммы) в донных отложениях, отобранных на профилях 2-ДВ-М и 1-ОМ (2007–2009 гг.) в Охотоморском регионе. Карта на основе тектонической карты В.В. Харахинова [10]. Красные кружки – места находок газогидратов; синие – газовые «факелы»; розовые кружки – газовые «факелы», обнаруженные в местах, где установлены залежи газогидратов; желтые пятна вдоль побережья о. Сахалин – нефтегазовые месторождения. Пунктиром выделены зоны аномальных концентраций метана в донных отложениях.

Fig. 8. CH₄ distribution (bar graphs) in the bottom sediments, sampled at the 2-DV-M and 1-OM profiles (2007–2009) in the Sea of Okhotsk region. The map is based on the tectonic map by V.V. Kharakhinov [10]. Red circles are the places where gas hydrate deposits are found; blue circles are gas flares; pink circles are gas flares which were found in places, where gas hydrate deposits are detected; yellow spots along the coast of Sakhalin Island are oil and gas fields. Zones of anomalous methane concentrations in the bottom sediments are marked by a dotted line.

часть таких работ провели в Восточно-Сибирском море на профиле 5-АР (мыс Биллингса – хребт Менделеева) (рис. 9).

Так же как и в Охотском море, под руководством Севморгео выполнено глубинное сейсмическое зондирование, а сотрудниками ТОИ ДВО РАН (под руководством к.г.-м.н. В.Г. Прокудина) – непрерывное сейсмическое профилирование и 56 станций литологического и газогеохимического опробования. Геологическими пробоотборниками (гравитационные трубки) подняты керны до 3 м длиной.

Газогеохимическая съемка в донных осадках по профилю позволила охарактеризовать следующие особенности распределения углеводородных газов. Метан установлен во всех газовых пробах из донных отложений в концентрациях от 2.0 ppm до 2.4 об.%. Фоновые концентрации метана в донных осадках составили 13 ppm (8 мкл/дм³). Это значение в 4 раза выше, чем в Охотском море. Таким образом, в Восточно-Сибирском море наблюдается достаточно высокий региональный углеводородный фон, который указывает на длительное диффузионное просачивание природного газа через слабопроницаемые толщи [9].

В целом, аномальные поля метана низкой и средней интенсивности прослеживаются на всем протяжении профиля (рис. 9). Исследованиями установлено, что эти поля формируются в пределах поднятий, которые характеризуются незначительной мощностью осадочного чехла, осложнены интенсивным развитием разломов и тектонической нарушенности и являются по своей сути областями газовой разгрузки. В центральной части профиля (на удалении 270 км) выделен участок разгрузки метана (2.4 об.%), который контролируется разломом. Высокие концентрации метана и углеводородных газов (до пентана), а также преобладание «тяжелого» изотопа углерода метана в осадках на всем протяжении

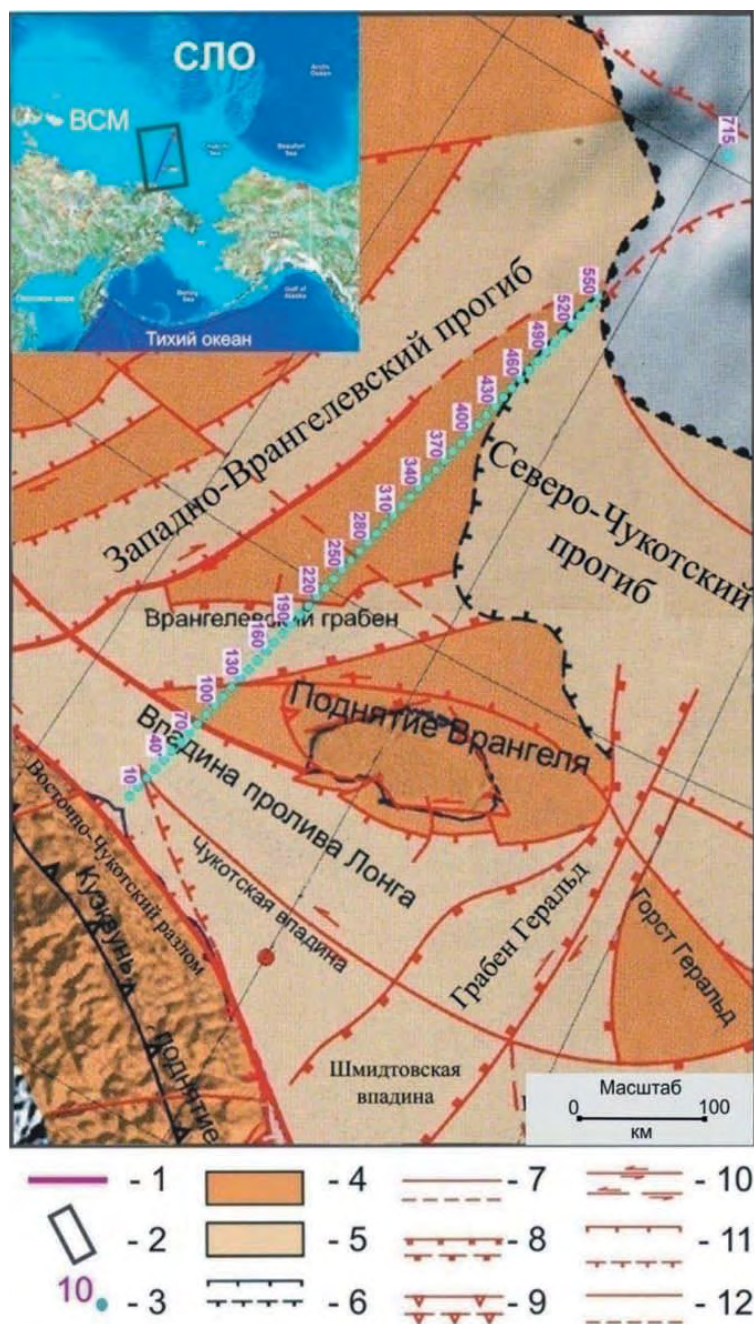


Рис. 9. Положение пикетов опробования донных осадков Восточно-Сибирского моря на карте неотектонических структур, выраженных в рельефе арктического шельфа [11]. 1 – профиль работ 2008 г.; 2 – полигон работ; 3 – пикеты опробования; 4 – поднятия и горсты, впадины, 5 – грабены, ramпы; 6 – границы достоверные/предполагаемые (штрихи направлены в сторону впадин). Новейшие разломы (главные разломы показаны утолщенными линиями): 7 – достоверные/предполагаемые; 8 – сбросы; 9 – взбросы; 10 – сдвиги; 11 – неустановленного типа; 12 – без установленного смещения. СЛО – Северный Ледовитый океан.

Fig. 9. Position of stakes of the bottom sediments sampling in the East Siberian Sea on the map of neotectonic structures expressed in the relief of the Arctic shelf [11]. 1 – profile of the works of 2008; 2 – site of the works; 3 – sampling stakes; 4 – uplifts and horsts, depressions; 5 – graben, ramps; 6 – reliable/presumptive boundaries (dashes are directed towards depressions). Recent faults (main faults are shown by thickened lines): 7 – reliable/presumptive; 8 – normal faults; 9 – reverse faults; 10 – strike-slip faults; 11 – unknown type; 12 – without identified displacement. СЛО – Arctic Ocean.

профиля (560 км) позволяет считать континентальный шельф Восточно-Сибирского моря высокоперспективным в отношении углеводородного потенциала [12, 13].

Сходство основных характеристик газогеохимического поля на всем шельфе и склоне Восточно-Сибирского моря является еще одним доказательством протяжения суверенного российского шельфа от берега до глубоководной котловины Северного Ледовитого океана.

Заключение

Государственное задание по программе определения границ распространения внешнего шельфа России выполнено в полном объеме. Использовались, главным образом, оборудование и приборы отечественного производства.

Экспедиционные работы, с активным участием ТОИ ДВО РАН совместно с ФГУНПП «Севморгео» по государственной программе «Внешняя граница континентального шельфа (Охотское и Восточно-Сибирское моря, 2006–2009 гг.)», позволили получить огромный фактический материал для фундаментальных исследований. В ходе попутных исследований были определены новые черты глубинного строения литосферы акваторий Дальнего Востока, особенности стратиграфии, палеогеографии, новые зоны нефтегазообразования, перспективные участки для поисков твердых минеральных ресурсов, газогидратов и др.

Проведенные фундаментальные исследования и достигнутые в экспедициях результаты послужили одной из основ для составления современных программ по изучению минерально-сырьевых ресурсов, расширения деятельности по изучению, освоению и использованию Мирового океана в интересах устойчивого развития и обеспечения национальной безопасности.

Результаты, полученные в рамках реализации госпрограммы, имели исключительно важное значение для обеспечения эффективной реализации национальных интересов Российской Федерации в Мировом океане. В Восточно-Сибирском, уникальном во всех отношениях, но и наименее изученном, море российской Восточной Арктики работы по обоснованию внешней границы шельфа, безусловно, необходимо продолжить. Кроме того, в целях ре-

ализации Морской доктрины РФ и поручения президента по развитию минерально-сырьевой базы необходимо провести комплексные работы по внешней границе континентального шельфа в Беринговом и Японском морях.

В настоящее время коллектив ТОИ ДВО РАН сохраняет свой научно-исследовательский потенциал на высоком уровне, позволяющий и в дальнейшем выполнять сложные геолого-геофизические исследования глубинного строения морского дна. Владеет методами и средствами, которые делают возможным расширить поле знаний о глубинном строении литосферы акваторий и определить перспективные площади для поисков твердых минеральных ископаемых, газогидратов и других ресурсов.

Список литературы

1. Сакулина Т.С., Каленич А.П., Атаков А.И., Тихонова И.М., Крупнова Н.А., Пыжьянова Т.М. **2011**. Геологическая модель Охотоморского региона по данным опорных профилей 1-ОМ и 2-ДВ-М. *Разведка и охрана недр*, 10: 11–17. EDN: OHAGYN
2. Сакулина Т.С., Верба М.Л., Кашубина Т.В., Крупнова Н.А., Табырца С.Н., Иванов Г.И. **2011**. Комплексные геолого-геофизические исследования на опорном профиле 5-АР в Восточно-Сибирском море. *Разведка и охрана недр*, 10: 17–23. EDN: OHAGYX
3. Обжиров А.И. **1993**. *Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов*. М.: Наука, 139 с.
4. Обжиров А.И., Астахова Н.В., Липкина М.И., Верещагина О.Ф., Мишукова Г.И., Сорочинская А.В., Югай И.Г. **1999**. *Газогеохимическое районирование и минеральные ассоциации дна Охотского моря*. Владивосток: Дальнаука, 184 с.
5. Vereshchagina O.F., Korovitskaya E.V., Mishukova G.I. **2013**. Methane in water columns and sediment of north western Sea of Japan. *Deep Sea Research. P. II: Topical studies in Oceanography*, 86-87: 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.08.017>
6. Мишукова Г.И., Шакиров Р.Б. **2017**. Пространственная изменчивость распределения метана в морской среде и его потоков на границе вода–атмосфера в западной части Охотского моря. *Водные ресурсы*, 44(4): 493–503.
7. Леликов Е.П., Маляренко А.Н. **1994**. *Гранитоидный магматизм окраинных морей Тихого океана*. Владивосток: Дальнаука, 268 с.
8. Васильев Б.И., Сигова К.И., Обжиров А.И., Югов И.В. **2001**. *Геология и нефтегазоносность окраинных морей северо-западной части Тихого океана*. Владивосток: Дальнаука, 303 с.
9. Шакиров Р.Б. **2018**. *Газогеохимические поля окраинных морей Восточной Азии*. М.: ГЕОС, 341 с.

10. Харахинов В.В. **1998.** *Тектоника Охотоморской нефтегазоносной провинции: дис. ... д-ра геол.-минер. наук.* Оха-на-Сахалине: СахалинНИПИМорнефть, 77 с.
11. *Геология и полезные ископаемые шельфов России: атлас. 2004.* М.: Науч. мир, 108 с.
12. Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И. **2013.** Газогеохимические аномалии в осадках Восточно-Сибирского моря. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(21): 98–110. EDN: RCCSOL
13. Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В., Мазуров А.К., Рубан А.С. **2017.** Газоносность донных осадков и геохимические признаки нефтегазоносности шельфа Восточно-Сибирского моря. *Тихоокеанская геология*, 36(4): 77–84.
5. Vereshchagina O.F., Korovitskaya E.V., Mishukova G.I. **2013.** Methane in water columns and sediment of north western Sea of Japan. *Deep Sea Research. P. II: Topical studies in Oceanography*, 86-87: 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.08.017>
6. Mishukova G.I., Shakirov R.B. **2017.** Spatial variations of methane distribution in marine environment and its fluxes at the water–atmosphere interface in the western Sea of Okhotsk. *Water Resources*, 44: 662–672. <https://doi.org/10.1134/S0097807817040133>
7. Lelikov E.P., Malyarenko A.N. **1994.** [*Granitoid magmatism of marginal seas of the Pacific Ocean*]. Vladivostok: Dal'nauka, 268 p. (In Russ.).
8. Vasiliev B.I., Sigova K.I., Obzhiriv A.I., Yugov I.V. **2001.** *Geology and oil-gas resources of the marginal seas of the northwestern Pacific*. Vladivostok: Dal'nauka, 303 p. (In Russ.).
9. Shakirov R.B. **2018.** *Gas-geochemical fields of the Eastern Asia marginal seas*. Moscow: GEOS, 341 p. (In Russ.).
10. Kharakhinov V.V. **1998.** [*Tectonics of the Sea of Okhotsk oil-gas province*]: [Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy) dissertation]. Okha-na-Sakhaline: Sakhalin-NIPImorneft'. (In Russ.).
11. *Geology and mineral resources of the Russian shelf areas: Atlas. 2004.* Moscow: Publ. House Scientific world, 108 p.
12. Shakirov R.B., Sorochinskaya A.V., Obzhiriv A.I. **2013.** Gasgeochemical anomalies in the sediments of East-Siberian Sea. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(21): 231–243. (In Russ.). EDN: RCCSOL
13. Gresov A.I., Obzhiriv A.I., Yatsuk A.V., Mazurov A.K., Ruban A.S. **2017.** Gas content of bottom sediments and geochemical indicators of oil and gas on the shelf of the East Siberian Sea. *Russian Journal of Pacific Geology*, 11: 308–314. <https://doi.org/10.1134/S1819714017040030>

References

1. Sakulina T.S., Kalenich A.P., Atakov A.I., Tihonova I.M., Krupnova N.A., Pyzhjanova T.M. **2011.** Geological model of the Okhotsk Sea region according to basic profiles 1-OM and 2-DW-M. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and protection of mineral resources*, 10: 11–17. (In Russ.). EDN: OHAGYN
2. Sakulina T.S., Verba M.L., Kashubina T.V., Krupnova N.A., Tabyrtsa S.N., Ivanov G.I. **2011.** Complex geological-geophysical researches on the 5-AP profile in the East-Siberian Sea. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and protection of mineral resources*, 10: 17–23. (In Russ.). EDN: OHAGYX
3. Obzhiriv A.I. **1993.** [*Gas-geochemical fields of the bottom layer of the seas and oceans*]. Moscow: Nauka, 139 p. (In Russ.).
4. Obzhiriv A.I., Astakhova N.V., Lipkina M.I., Vereshchagina O.F., Mishukova G.I., Sorochinskaya A.V., Yugai I.G. **1999.** *Gas-geochemical zoning and mineral associations of the floor of the Sea of Okhotsk*. Vladivostok: Dal'nauka, 184 p. (In Russ.).

Об авторах

Сотрудники лаборатории газогеохимии, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток:

Шакиров Ренат Белалович (<https://orcid.org/0000-0003-1202-0351>), доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе, руководитель лаборатории, ren@poi.dvo.ru

Мальцева Елена Валерьевна (<https://orcid.org/0000-0003-3230-7042>), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, ekor@poi.dvo.ru

Веникова Анна Леонидовна (<https://orcid.org/0000-0002-1445-8579>), научный сотрудник, anett29@mail.ru

Соколова Наталья Леонидовна (<https://orcid.org/0000-0002-2248-6924>), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, natap81@mail.ru

Гресов Александр Иванович (<https://orcid.org/0000-0002-2133-411X>), доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, gresov@poi.dvo.ru

About the Authors

Employees of the Gas Geochemistry Laboratory, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok:

Shakirov, Renat B. (<https://orcid.org/0000-0003-1202-0351>), Doctor of Geology and Mineralogy, Deputy Director, Head of the Laboratory, ren@poi.dvo.ru

Maltseva, Elena V. (<https://orcid.org/0000-0003-3230-7042>), Cand. of Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, ekor@poi.dvo.ru

Venikova, Anna L. (<https://orcid.org/0000-0002-1445-8579>), Researcher, anett29@mail.ru

Sokolova, Natalia L. (<https://orcid.org/0000-0002-2248-6924>), Cand. of Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, natap81@mail.ru

Gresov, Alexandr I. (<https://orcid.org/0000-0002-2133-411X>), Doctor of Geology and Mineralogy, Principal Researcher, gresov@poi.dvo.ru

Поступила 30.08.2023

Принята к публикации 09.09.2023

Received 30 August 2023

Accepted 9 September 2023

© Авторы 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.526.6,528.88(265.546)

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.276-291>
<https://www.elibrary.ru/pzvwvvp>

Сезонные и межгодовые вариации температуры поверхности моря в Татарском проливе по спутниковым данным*

Г. В. Шевченко^{@1,2}, Д. М. Ложкин¹

@ E-mail: shevchenko_zhora@mail.ru

¹Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства
и океанографии, Южно-Сахалинск, Россия

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. Цель работы – провести системный статистический анализ пространственно-временной изменчивости температуры поверхности моря (ТПМ) на акватории Татарского пролива на основе спутниковых данных 1998–2021 гг., накопленных в Сахалинском филиале ВНИРО с помощью приемной станции TeraScan. Выявлено, что в различные сезоны года структура ТПМ сходна. Наиболее высокие значения ТПМ отмечаются на юго-востоке, самые низкие – на северо-западе пролива. Существенные различия наблюдаются осенью за счет формирования полосы холодной воды вдоль западного побережья Сахалина (сужающейся в южной части острова), обусловленной формированием прибрежного апвеллинга под воздействием характерных для холодного сезона ветров северного румба. Расчет коэффициентов линейного тренда выявил тенденцию к понижению температуры поверхностного слоя в Татарском проливе, наиболее выраженную зимой (в северной части бассейна) и весной ($-0.5 \dots -1$ °C/10 лет). Важный новый результат получен при разложении поля ТПМ по ЕОФ, он связан с резким изменением характера временной функции третьей моды, которое случилось в 2013–2014 гг. Такие изменения можно характеризовать как климатический сдвиг в изучаемой акватории. Наиболее выражен он в северо-западной части пролива и у юго-западного берега о. Сахалин, где изменение составило около 1 °C. Это обстоятельство может оказывать заметное влияние на состояние популяций нескольких видов креветки и промысловых рыб.

Ключевые слова: температура поверхности моря, Татарский пролив, сезонные вариации, тренд, естественные ортогональные функции, климатический сдвиг

Seasonal and interannual variations in sea surface temperature in the Tatar Strait according to satellite data*

Georgy V. Shevchenko^{@1,2}, Dmitry M. Lozhkin¹

@ E-mail: shevchenko_zhora@mail.ru

¹Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. The aim of the work was to conduct a systematic statistical analysis of the spatial and temporal variability of sea surface temperature (SST) in the waters of the Tatar Strait based on satellite data accumulated in the Sakhalin branch of VNIRO using the TeraScan receiving station for 1998–2021. It was revealed that in different seasons of the year the SST structure is similar and characterized by the highest values in the southeast and the lowest in the northwest of the strait. An important new result was obtained by expanding of the SST field in terms of the EOF, which is associated with a sharp change in the nature of the time function of the third mode, which occurred in 2013–2014. Such changes can be considered as a climatic shift in the studied area most pronounced in the northwestern part of the strait and near

* Полный текст данной статьи на английском языке размещен на сайте журнала [The full text of this article in English can be found on the website of the «Geosystems of Transition Zones» journal]: <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2023-3-4.pdf>

the southwestern coast of Sakhalin Island, where the change was about 1 °C. This circumstance can have a noticeable effect on the state of populations of several species of shrimp and commercial fish.

Keywords: sea surface temperature, Tatar Strait, seasonal variations, trend, empirical orthogonal functions, climatic shift

Для цитирования: Шевченко Г.В., Ложкин Д.М. Сезонные и межгодовые вариации температуры поверхности моря в Татарском проливе по спутниковым данным. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 3, с. 276–291. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.276-291>; <https://www.elibrary.ru/pzvwpv>

For citation: Shevchenko G.V., Lozhkin D.M. Seasonal and inter-annual variations in sea surface temperature in the Tatar Strait according to satellite data. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 276–291. (In Russ. and in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.276-291>; <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2023-3-4.pdf>

Введение

Акватория Татарского пролива имеет важнейшее промысловое значение. У западного побережья Сахалина растет добыча сельди и мойвы, здесь также вылавливается значительное количество креветки различных видов. Однако несколько лет назад наметились негативные тенденции в состоянии их запаса, что стало одной из побудительных причин исследования пространственно-временной изменчивости термических условий в этом районе. Изменения термического режима в условиях изменяющегося климата могли влиять и на наблюдающийся в последние годы существенный рост численности сельди, которая с середины 1940-х до середины 1970-х годов прошлого века была важнейшим объектом промысла в данном бассейне, а также на состояние популяций тихоокеанских лососей.

Вариациям термического режима в Татарском проливе посвящено немало работ. Основная часть из них основана на материалах океанологических съемок [1–9], в последние годы увеличивается количество исследований, базирующихся на спутниковых данных [10–13], реже на результатах измерений на береговых гидрометеорологических станциях [14–17]. Межгодовые колебания температуры морской воды в северной части пролива рассматривались также при изучении изменчивости ледовых условий [18–19].

Однако большинство из указанных исследований основывалось на материалах судовых измерений, выполненных к тому же до наступления эпохи глобального потепления. В других работах изучались отдельные аспекты термического режима (например, наличие

однонаправленных тенденций в вариациях температуры поверхностного слоя воды) или анализировались ситуации, характеризовавшиеся существенными отклонениями от обычного режима. В то же время систематического статистического пространственно-временного анализа этих условий выполнено не было.

В отличие от традиционных судовых океанологических съемок, спутниковые наблюдения за температурой поверхности моря (ТПМ) характеризуются полным охватом акватории и регулярностью поступления данных. Поэтому они являются наиболее подходящим материалом для изучения пространственно-временных вариаций термического режима в условиях изменяющегося климата с применением различных методов статистического анализа и существенно дополняют традиционные судовые исследования (равно как океанологические зондирования позволяют оценить отклик во всей водной толще на изменения в поверхностном слое моря).

В данной работе основное внимание уделено межгодовой изменчивости (а также сезонным вариациям) термических условий на основе материалов спутниковых наблюдений за температурой поверхности за 1998–2021 гг. Для решения поставленной задачи использован метод естественных ортогональных функций (ЕОФ).

Материалы и методы исследования

В Сахалинском филиале ВНИРО накоплен значительный объем данных спутниковых наблюдений за температурой поверхности моря благодаря установленной в 1997 г. приемной спутниковой станции TeraScan. С 1998 г. на-

лажен регулярный прием поступающих материалов наблюдений и формирование базы данных, основой которой являются суточные распределения параметра с пространственным разрешением около 2 км.

Помимо этого для осуществления различных расчетов (определение средних многолетних значений – норм, аномалий температуры, линейных трендов, параметров сезонных гармоник и т.д.) созданы базы с пространственным разрешением четверть градуса и осреднением по времени с периодами 10 сут и 1 мес. За последние 5 лет сохранены также отдельные спутниковые снимки. Анализ всех этих материалов выполнен ниже для определения характера сезонных и межгодовых вариаций ТПМ. В наиболее полной форме они отражены при разложении гидрометеорологических параметров по естественным ортогональным функциям – ЕОФ [20]. В данной работе, кроме разложения поля ТПМ по ЕОФ, рассмотрены усредненные пространственные распределения данного параметра в различные сезоны года, рассчитаны амплитуды и фазы годовой и полугодовой гармоник и коэффициенты линейного тренда, а также наиболее значительные отклонения ТПМ от средних многолетних значений.

Результаты и обсуждение

Усредненные распределения ТПМ по сезонам года

На рис. 1 представлены средние многолетние распределения температуры поверхности моря в Татарском проливе в различные сезоны года. Зимой (январь–март) в северной части данной акватории, находящейся к северу от параллели 49° с.ш. температура воды отрицательная. В этом районе обычно формируется ледяной покров, наибольшая ледовитость наблюдается во второй половине января – феврале. Самые низкие значения, около –1 °С, отмечены между параллелями 50° и 51°. Вода с отрицательными значениями, плавно изменяющимися от –0.6 до –0.1 °С, занимает полосу вдоль континентального побережья, ширина которой также постепенно уменьшается. У западного берега о. Сахалин отметки немного ниже 0 °С наблюдаются

на Чехово-Ильинском мелководье. В южной части пролива вода более теплая, с положительными значениями ТПМ, что обусловлено остаточным влиянием теплого Цусимского течения. Максимальные значения температуры (около 3.5 °С) выявлены на южной границе изучаемого бассейна между меридианами 140° и 141°.

Весной структура пространственного распределения температуры поверхности моря в Татарском проливе имеет схожий характер: наиболее теплая вода (7.5–7.8 °С) поступает с юга с Цусимским течением и движется в направлении небольшого острова Монерон, оставляя узкую полосу более холодной воды вблизи берега о. Сахалин. Обширное пятно воды с низкими значениями температуры (3.5–3.8 °С) образуется в северной части рассматриваемого бассейна, на некотором удалении от берегов, за исключением континентального побережья между 48.5 и 50° с.ш.

Летом структура распределения сохраняется, только значения ТПМ существенно возрастают на всей акватории пролива. Так, в его юго-восточной части, в зоне залива Цусимского течения, отмечены максимальные значения, 18.4 °С, а на северо-западе минимальные, 14.5 °С.

Осенью происходят определенные изменения в распределении ТПМ, обусловленные перестройкой поля ветра к зимнему муссону, для которого характерны сильные и устойчивые северо-западные и северные ветра. В результате их сгонного действия в северной части акватории, примыкающей к прол. Невельского, наблюдается наиболее холодная вода с температурой около 3.5 °С. Благодаря поступлению из Амурского лимана распресненной воды стока р. Амур, менее плотная, хотя и сравнительно холодная вода движется на юг вдоль материкового побережья. Вдоль западного берега Сахалина также отмечается полоса холодной воды, но обусловлена она воздействием ветра, а именно формированием ветрового апвеллинга, когда воздушный поток оставляет берег слева [3, 9]. За счет более низкой температуры образуется прибрежный поток воды с высокой плотностью, направленный на юг. Как следует из рис. 1, он достигает Чехово-Ильинского мелководья, где эта вода оттесняет теплую воду Цусимского течения в централь-

ную часть Татарского пролива. У юго-западного побережья острова апвеллинг выражен слабее.

Для изучения вариаций ТПМ во времени акватория пролива была разбита на 3 части: северную, к северу от параллели 49°; юго-восточную, расположенную к югу от указанной параллели и к востоку от меридиана 141°; и юго-западную, к западу от него. Очевидно, северная часть по своему термическому режиму существенно отличается от южной, так как является значительно более холодной. Мы также исходили из того, что область к востоку от 141-го меридиана, включающая область шельфа и материкового склона у юго-западного берега Сахалина, находится под более сильным влиянием Цусимского течения, чем западная, в значительной мере испытывающая воздействие холодного Приморского течения.

На рис. 2 представлены графики вариаций ТПМ в трех указанных районах. Видно, что в северном районе температура поверхностного слоя заметно ниже, чем в южных, в особенности в зимний период. Ожидалось, что в юго-восточной части значения ТПМ будут заметно выше, чем в юго-западной. В большинстве случаев это так, но различия малы, а в некоторых случаях летние максимумы выше в юго-западном районе (2002–2003, 2011 гг.). Возможно, деление на области было не оптимальным,

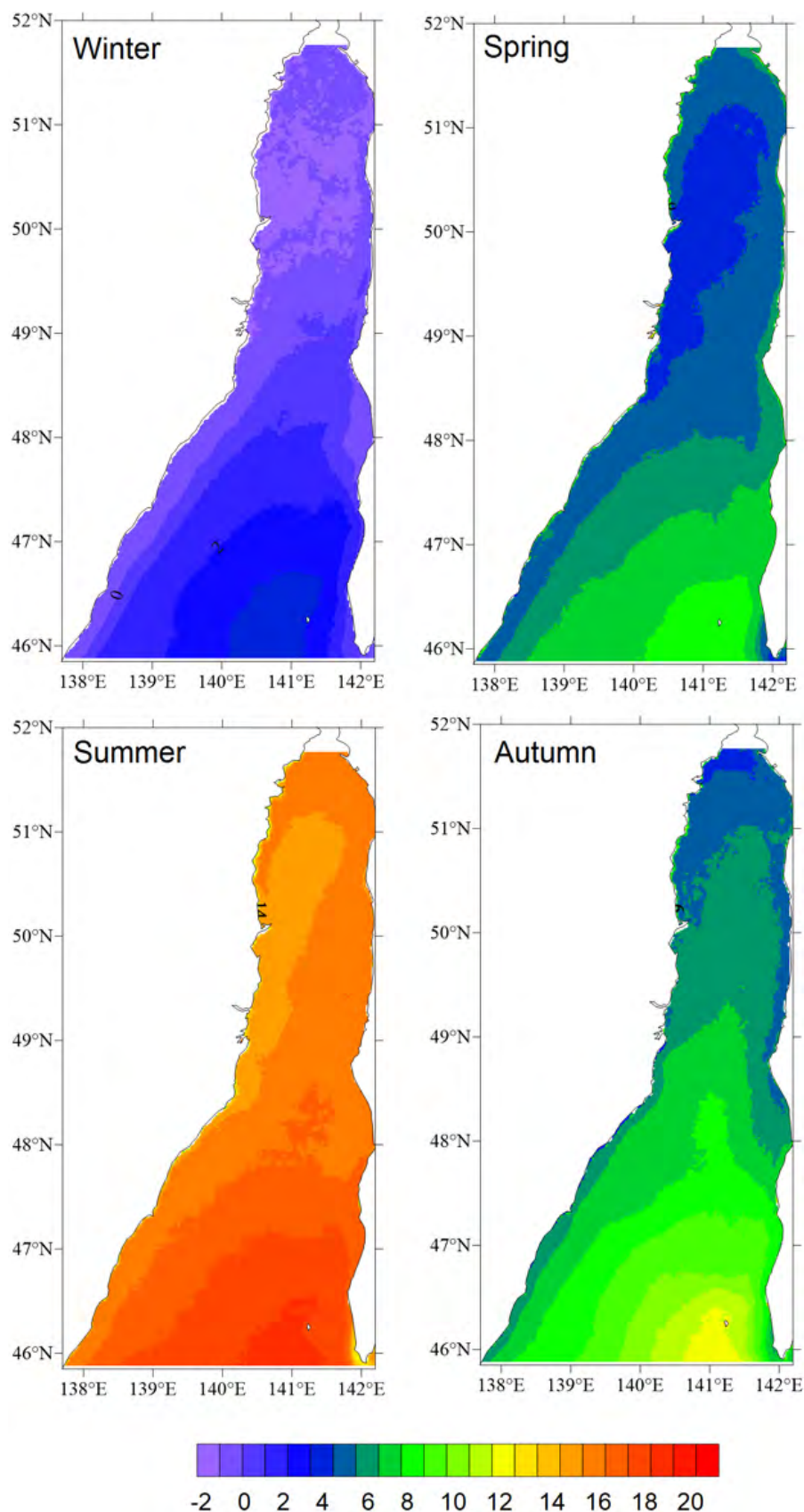


Рис. 1. Среднее многолетнее распределение ТПМ (в °C) в Татарском проливе зимой, весной, летом и осенью.

Fig. 1. Average long-term distribution of SST (in °C) in the Tatar Strait in winter, spring, summer and autumn.

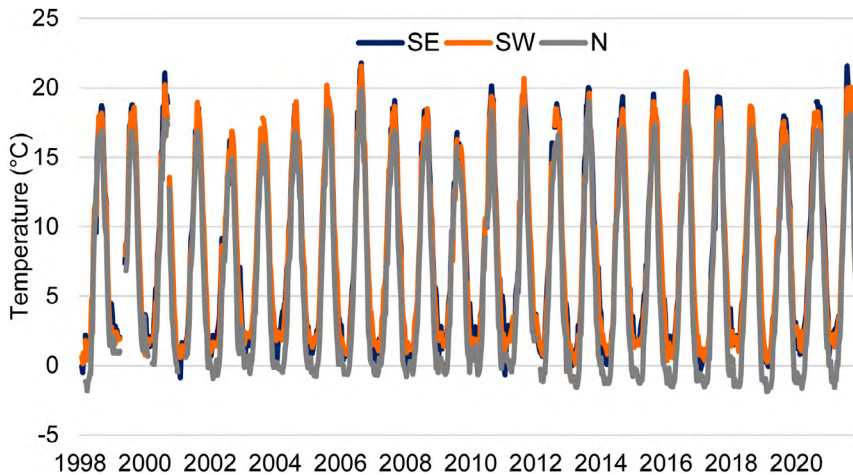


Рис. 2. Графики вариаций ТПМ (в °C), усредненных по северной, юго-восточной и юго-западной частям Татарского пролива.

Fig. 2. Graphs of SST variations (in °C) averaged over the northern, southeastern, and southwestern parts of the Tatar Strait.

однако разделение по меридиану 140° также не было более удачным. Но эти обстоятельства не так существенны, важен тот факт, что межгодовые вариации, выраженные в модуляции годового хода, идентичны во всех районах, а значит, определяются одинаковыми причинами. В них просматриваются выраженные квазициклические составляющие, по визуальной оценке с периодом 6–7 лет. На характере межгодовых колебаний остановимся ниже, вначале рассмотрим сезонную изменчивость ТПМ.

Сезонные вариации ТПМ

В табл. 1 приведены средние многолетние значения ТПМ для каждого месяца в трех указанных выше районах Татарского пролива. Во всех районах максимум наблюдается в августе, его величина составляет 16.6 °C в северном, 18.25 °C в юго-западном и 18.35 °C в юго-восточном. В сентябре также отмечены теплые условия (усредненное значение ТПМ существенно выше, чем в июле, и примерно на 1 °C ниже, чем в августе). Минимальные температуры выявлены в северном и юго-западном районах в марте, а в юго-восточном в феврале – в марте здесь уже начинает сказываться тепляющее влияние Цусимского течения и значение выше не только февральского, но и январского показателей.

Рассчитывалась также величина среднеквадратического отклонения, характеризующая степень изменчивости параметра.

В холодный период года она значительно меньше, чем в теплый (в 1.5–2 раза), что вполне естественно. На этом фоне резко выделяется низкими значениями сентябрь, что указывает на существенно более стабильные термические условия во всех трех районах в этом месяце по сравнению с другими. Физическую причину этого интересного явления объяснить сложно, учитывая, что обычно в третьей декаде сентября происходит перестройка поля ветра от летнего муссона к зимнему и метеорологические условия трудно

назвать устойчивыми.

Временные функции вариаций ТПМ в каждом из районов хорошо описываются комбинацией годовой и полугодовой гармоник. Амплитуды и фазы этих составляющих, рассчитанных методом наименьших квадратов, приведены в табл. 2. Так, в северном районе амплитуда годовой гармоник составила 8.6 °C, на ее долю приходилось 93 % дисперсии параметра, амплитуда полугодовой составляющей была существенно меньше (2.3 °C), и ее вклад составлял 6.8 %.

Таблица 1. Средние многолетние значения ТПМ (в °C) в различных районах Татарского пролива для различных месяцев года

Table 1. Average long-term SST values (in °C) in different parts of the Tatar Strait for different months of the year

Месяц	Север	Юго-запад	Юго-восток
Январь	0.01	1.74	1.54
Февраль	–0.46	1.54	1.35
Март	–0.72	1.36	1.58
Апрель	0.06	2.34	2.72
Май	3.24	4.98	5.26
Июнь	8.49	9.49	9.61
Июль	13.44	14.70	14.83
Август	16.61	18.25	18.35
Сентябрь	15.52	16.98	17.04
Октябрь	9.93	12.16	11.76
Ноябрь	3.72	7.11	6.45
Декабрь	0.54	3.26	3.77

В юго-западном районе амплитуды этих гармоник были меньше (8.3 и 2.0 °C), а их доли составляли 94.5 и 5.4 % соответственно. На юго-восточном участке амплитуды сезонных колебаний были точно такими же, как и на юго-западном, а их доли имели близкие значения (94.3 и 5.4 %).

Амплитуда годовой гармоники существенно изменялась в разные годы. Наименьшее значение для всех районов отмечено в холодном 2002 г. (7.6; 7.4 и 6.8 °C в северном, юго-западном и юго-восточном районах соответственно), а наибольшее – в теплом 2006 (9.5; 9.2 и 9.4 °C соответственно).

На рис. 3 представлены пространственные распределения амплитуды и фазы годовой гармоники, рассчитанные за период 1998–2021 гг. Для северной части пролива из-за пропусков данных, обусловленных влиянием ледяного

покрова, эти величины корректно не определялись, так что полученные значения относились только к южной части северного района.

В целом в масштабах всего Татарского пролива вариации данных параметров невелики. Амплитуда годовой гармоники колеблется в пределах от 7.9 °C (два небольших пятна в районе мыса Ламанон) до 9 °C на севере, вблизи зоны, где значения рассчитать не удалось из-за влияния льдов. Фаза этой составляющей также менялась в узких пределах: на основной части акватории пролива от 217 до 221°, что отвечает максимуму в первой половине августа. В узкой полосе вдоль западного берега Сахалина значения фазы несколько меньше, от 206 до 209°.

Амплитуда полугодовой гармоники минимальна на юго-востоке пролива, в области, примыкающей к прол. Лаперуза (около 1.5 °C), и максимальна вблизи берега Сахалина на участке от 49.5 до 50.5° с.ш., где она достигает 2.5 °C. Фаза этой составляющей на большей части пролива колеблется в пределах 65–75°, и только вблизи прол. Лаперуза возрастает до 100°.

Таблица 2. Амплитуды (H) и фазы (G) годовой и полугодовой гармоник в различных частях Татарского пролива

Table 2. Amplitudes (H) and phases (G) of the annual and semi-annual harmonics in different parts of the Tatar Strait

Период	Север		Юго-запад		Юго-восток	
	H, °C	G, °	H, °C	G, °	H, °C	G, °
Год	8.6	213.9	8.3	217.5	8.3	215.8
Полгода	2.3	67.9	2	75.1	2	73.7

Межгодовая изменчивость термических условий

В современных условиях, когда главную роль в изменениях климата на Земле играет

глобальное потепление, при изучении вариаций термических условий в морских акваториях наиболее часто возникает вопрос о наличии в них однонаправленных тенденций (трендов). Для ответа на этот вопрос в каждой пространственной четвертьградусной ячейке акватории Татарского пролива были рассчитаны коэффициенты линейного тренда. Расчеты выполнялись для полного года, посезонно и для каждого месяца отдельно. На рис. 4 представлены результаты вычислений для различных сезонов года, коэффициен-

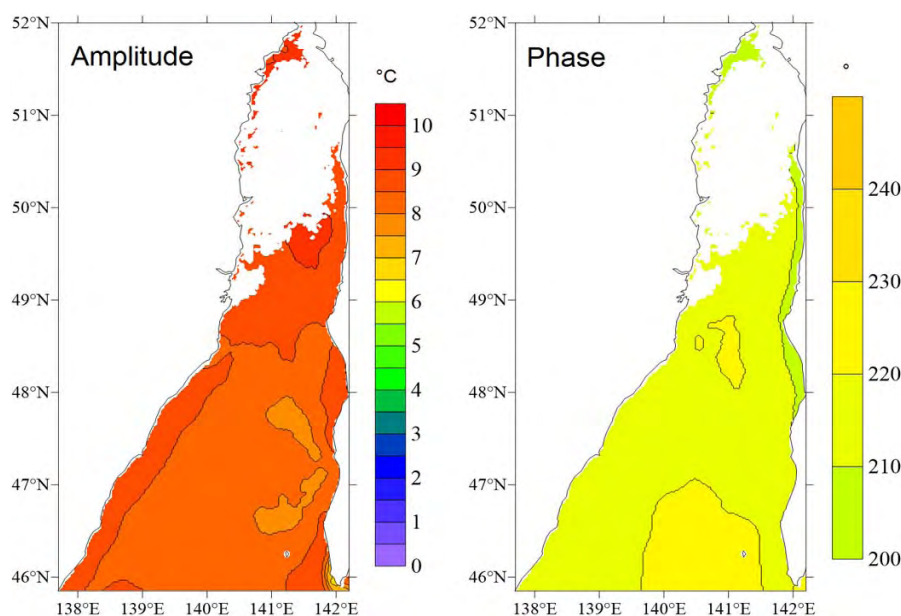


Рис. 3. Пространственное распределение амплитуды (в °C) и фазы (в °) годовой гармонки ТПМ Татарском проливе.

Fig. 3. Spatial distribution of the amplitude (in °C) and phase (in °) of the annual SST harmonic in the Tatar Strait.

ты линейного тренда приведены к значениям за 10 лет.

Зимой тренды преимущественно отрицательные, наибольших значений (по абсолютной величине) достигают в северной, замерзающей части пролива на некотором удалении от берега: $(-0.5 \dots -1) ^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$. Это удивительный факт, он в определенной мере противоречит представлению об уменьшении ледовитости (доли площади акватории, которая покрыта льдом) в этом районе в результате повышения температуры атмосферного воздуха в зимний период [19].

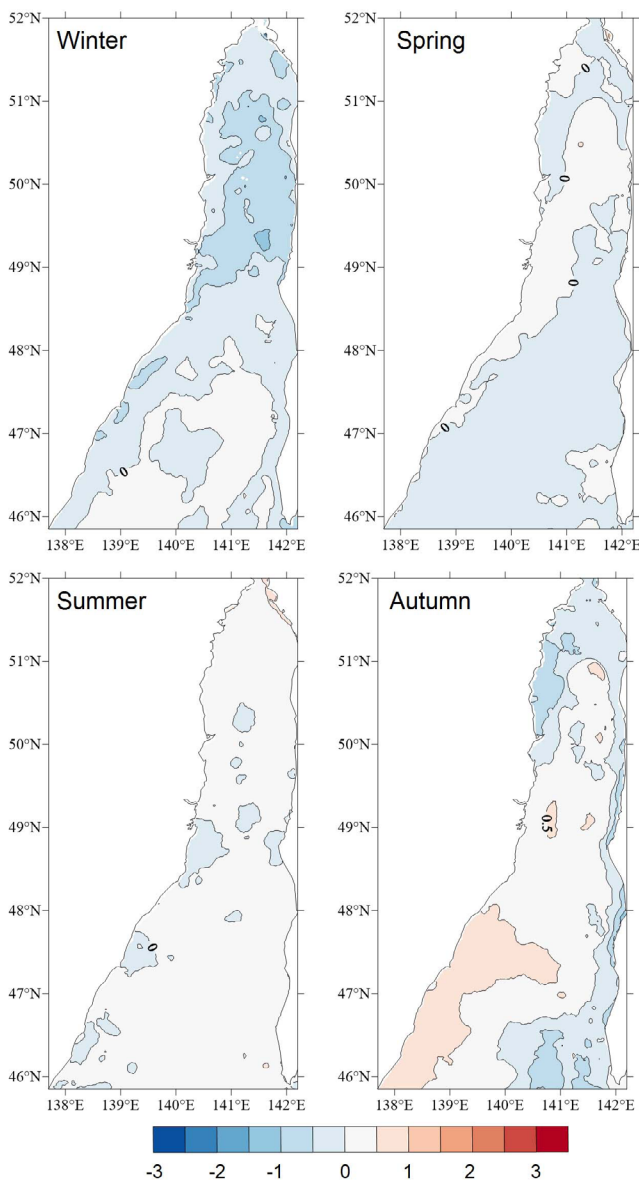


Рис. 4. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда ТПМ (в $^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$) в различные сезоны года в Татарском проливе.

Fig. 4. Spatial distribution of SST linear trend coefficients (in $^\circ\text{C}/10 \text{ years}$) in different seasons in the Tatar Strait.

В южной части пролива однонаправленные тенденции выражены слабо, южнее параллели 48° отмечены преимущественно положительные значения коэффициента линейного тренда, но небольшие по величине.

Весной ситуация противоположная: в северной части пролива преобладают незначительные по величине положительные, а в южной – отрицательные тренды. Это усложняет объяснение отрицательных трендов в замерзающем районе зимой увеличением глубины зимней конвекции, так как в Охотском море аналогичное явление приводило к наиболее значительным отрицательным трендам именно весной, в апреле и мае, и это имело вполне убедительное объяснение [13]. Это подчеркивает сложность процессов, связанных с откликом на глобальное потепление в различных бассейнах.

Летом практически на всей акватории пролива наблюдаются небольшие по величине положительные значения коэффициента линейного тренда в интервале от 0.05 до $0.1 ^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$, и лишь на отдельных участках они возрастают до $0.2 ^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$. Отрицательные значения отмечены в небольших по площади областях, и они не превышают $0.05 ^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$ по абсолютной величине.

Наиболее сложная картина однонаправленных изменений ТПМ выявлена осенью. В северной части пролива и в прибрежной зоне у западного берега о. Сахалин определены существенные отрицательные коэффициенты линейного тренда $(-0.3 \dots -0.7 ^\circ\text{C}/10 \text{ лет})$, а на юго-западе изучаемой акватории вблизи материкового побережья выделяется область, где температура поверхности моря устойчиво возрастает со скоростью $0.5\text{--}0.7 ^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$. Возможной причиной такой сложной картины изменчивости ТПМ могут быть смены интенсивности ветрового воздействия, но этот вопрос требует специального исследования.

Обратимся теперь к графику вариаций ТПМ в трех районах Татарского пролива (см. рис. 2). На нем визуальнo просматриваются хорошо выраженные вариации термических условий в летний период (огibaющая по максимумам). Хорошо видно, что в 2000, 2006, 2016 и особенно в 2021 г. в Татарском проливе наблюдались условия существенно более теплые, чем в «обычные» годы, когда температура воды

близка к средним многолетним значениям. Холодные условия в изучаемой акватории выявлены в 2002, 2009 и 2019 гг., различия в средних по районам значениях ТПМ достигали 5 °С.

В вариациях максимумов ТПМ прослеживаются квазиритмические составляющие, для оценки которых использовалась методика, предложенная в работе [21]. Для определения вклада циклической составляющей с заданным периодом в каждой пространственной ячейке области методом наименьших квадратов рассчитывали ее амплитуду и фазу по выборкам за август. Далее эту компоненту вычитали из исходного ряда, значимость вклада гармоник определяли по отношению дисперсии остаточного ряда к дисперсии исходного для всех ячеек по акватории Татарского пролива. Периоды циклических компонент задавали от 3 до 12 лет с шагом 3 мес.

Наименьшая доля остаточной дисперсии была получена для гармоник с периодом 6 лет. Амплитуда этой составляющей на всей акватории пролива была близка к 1 °С (чуть меньше этой величины на участке между параллелями 49° и 51° и несколько выше за пределами этой области).

Значимые аномалии ТПМ

По сути, отмеченные выше теплые и холодные годы определялись по визуальным оценкам, в то же время выявление масштабных (как по величине, так и по площади акватории) аномалий ТПМ (т.е. отклонений от средних многолетних значений, называемых нормами) представляет значительный интерес. Он связан с тем, что такие ситуации, называемые некоторыми специалистами «термическими катастрофами», представляют серьезную опасность для морской биоты. Для оценки таких ситуаций была разработана методика [22], заключающаяся в определении площади, на которой аномалия превышала удвоенную величину среднеквадратического отклонения σ . Обычно отклонения от нормы подчиняются нормальному распределению, для которого величина 2σ соответствует границе, в пределах которой лежат 95 % значений параметра. Следовательно, выход за ее пределы свидетельствует об экстраординарности условий, в данном случае об экстраординарных термических условиях

состояния окружающей среды. Если такие аномалии наблюдаются на заметной части изучаемой акватории, то ситуация очень серьезна и заслуживает внимательного изучения.

Для каждого месяца каждого года наблюдений были рассчитаны средние многолетние значения (нормы) в каждой пространственной ячейке и величина среднеквадратического отклонения. Были проанализированы пространственные распределения величины σ для различных месяцев, прежде всего для теплого сезона (уже отмечено выше, что в сентябре усредненная по районам величина данного параметра была примерно в 1.5 раза меньше, чем в августе). В июне распределение σ однородно, вариации параметра невелики: на большей части изучаемой акватории он изменяется в пределах от 1.1 до 1.4 °С. Лишь в узких прибрежных полосах как у западного, так и у восточного берега пролива его значения возрастают до 1.5–1.6 °С. В июле в северной части изучаемой акватории характер распределения σ практически не изменяется, а к югу от параллели 48° σ возрастает до 2–2.4 °С. В августе, напротив, более высокие значения σ отмечены в северной части пролива, а в южной примерно такие же, как в июне.

Разность текущего среднемесячного значения и нормы (собственно аномалия) сравнивалась с удвоенной величиной среднеквадратического отклонения, подсчитывалась площадь, занятая такими значимыми аномалиями. На графике рис. 5 представлена доля площади значимой аномалии по отношению ко всей акватории Татарского пролива.

Наибольший интерес представляют ситуации, когда такие аномалии занимали значительную часть изучаемого бассейна. В большинстве случаев они проявлялись на небольших участках, составлявших 2–3 % от площади акватории пролива, и сравнительно редко превышали отметку 10 %. Для детального анализа были отобраны наиболее важные ситуации – когда площадь аномалий была не менее 15 % от площади пролива. Таких случаев было 9, в 5 из них наблюдались положительные, в 4 – отрицательные аномалии (табл. 3). В двух из них (август 2002 и октябрь 2020 г.) доля площади, на которой наблюдалась аномалия, превышавшая 2σ , была

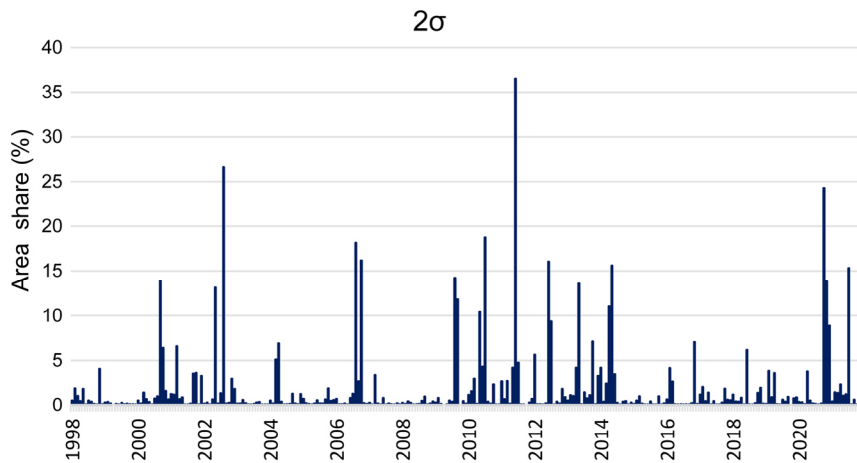


Рис. 5. Доля площади (по отношению ко всему Татарскому проливу), в которой аномалия ТПМ превышала величину 2σ .

Fig. 5. Percentage of the area (in relation to the entire Tatar Strait) in which the SST anomaly exceeded 2σ .

около четверти, а в июне 2011 г. – более трети от площади всего пролива.

На рис. 6 представлено пространственное распределение трех наиболее значительных отрицательных и положительных аномалий ТПМ.

В августе 2002 г. отрицательные отклонения от средних многолетних значений наблюдались на всей акватории Татарского пролива, что позволяет отнести этот год к «холодным». Наиболее значимы они были в северной части пролива, вблизи его вершины аномалия достигала -7°C . Значительные отклонения от нормы (до -6°C) выявлены на юго-востоке, вблизи прол. Лаперуза. На основной части акватории аномалии были более умеренными, от -3 до -5°C , а вблизи материкового побере-

Таблица 3. Информация о наиболее значительных аномалиях ТПМ в Татарском проливе

Table 3. Information on the most significant SST anomalies in the Tatar Strait

Месяц, год	Доля площади, %	Знак аномалии
Август 2002	26.61	–
Август 2006	18.17	+
Октябрь 2006	16.16	+
Июль 2010	18.77	–
Июнь 2011	36.51	–
Июнь 2012	16.03	+
Май 2014	15.59	–
Октябрь 2020	24.29	+
Июль 2021	15.30	+

жья их проявление было наиболее слабым, от -2 до -3°C . Доля площади, на которой аномалия превышала пороговое значение 2σ , составила более 26 %.

В июле 2010 г. характер пространственного распределения аномалии был сходным. Наиболее значительные отклонения от нормы (около -5 и даже на отдельных участках -6°C) наблюдались вдоль всего западного берега о. Сахалин, в особенности на северном и южном его участках.

В центральной части пролива аномалии не так велики (от -2 до -3°C), еще меньше они у берега материка, в особенности на участке, прилегающем к Советской Гавани (порту Ванино), где их величина около -0.5°C . Аномалии, превышавшие пороговое значение 2σ , занимали около 19 % площади пролива, преимущественно в его восточной части.

В июне 2011 г. отрицательные аномалии наблюдались на всей акватории пролива. На основной ее части они лежали в пределах от -3 до -4.5°C , на юго-восточном участке имели наибольшую выраженность, до -5.5°C . Самые низкие значения обнаружены в северной части пролива, в районе Александровска-Сахалинского, на некотором удалении от берега (около -1.7°C). Аномалии, превышавшие значение 2σ , отмечены на 36.5 % площади изучаемого бассейна, что указывает на необычность термических условий в Татарском проливе.

В августе 2006 г. положительные аномалии ТПМ выявлены на всей акватории Татарского пролива. Этот год и по визуальной оценке на основе графика хода среднемесячных значений (см. рис. 2) в различных районах изучаемой акватории был отнесен к числу наиболее «теплых» лет. Наибольшая величина аномалий отмечена в северной и центральной частях пролива – в пределах от 2.5 до 3.5°C . В южной части (у берега Приморья к югу от параллели 48° , а у юго-западного Сахалина южнее 47° с.ш.) величина аномалий несколько меньше, от 1.3 до 2.8°C . Площадь, заня-

тая аномалиями, превышающими пороговое значение 2σ , составила более 18 % акватории пролива.

В июне 2012 г. значительные положительные аномалии были обнаружены в широкой полосе, примыкающей к берегу материка южнее 49° с.ш. В северной части пролива и у

западного побережья Сахалина значения аномалии колеблются преимущественно в пределах от 1 до 2°C , за исключением нескольких пятен в районе Углегорска, мыса Ламанон и п-ова Крильон.

Повышенный температурный фон сохранился также и в июле, прежде всего в запад-

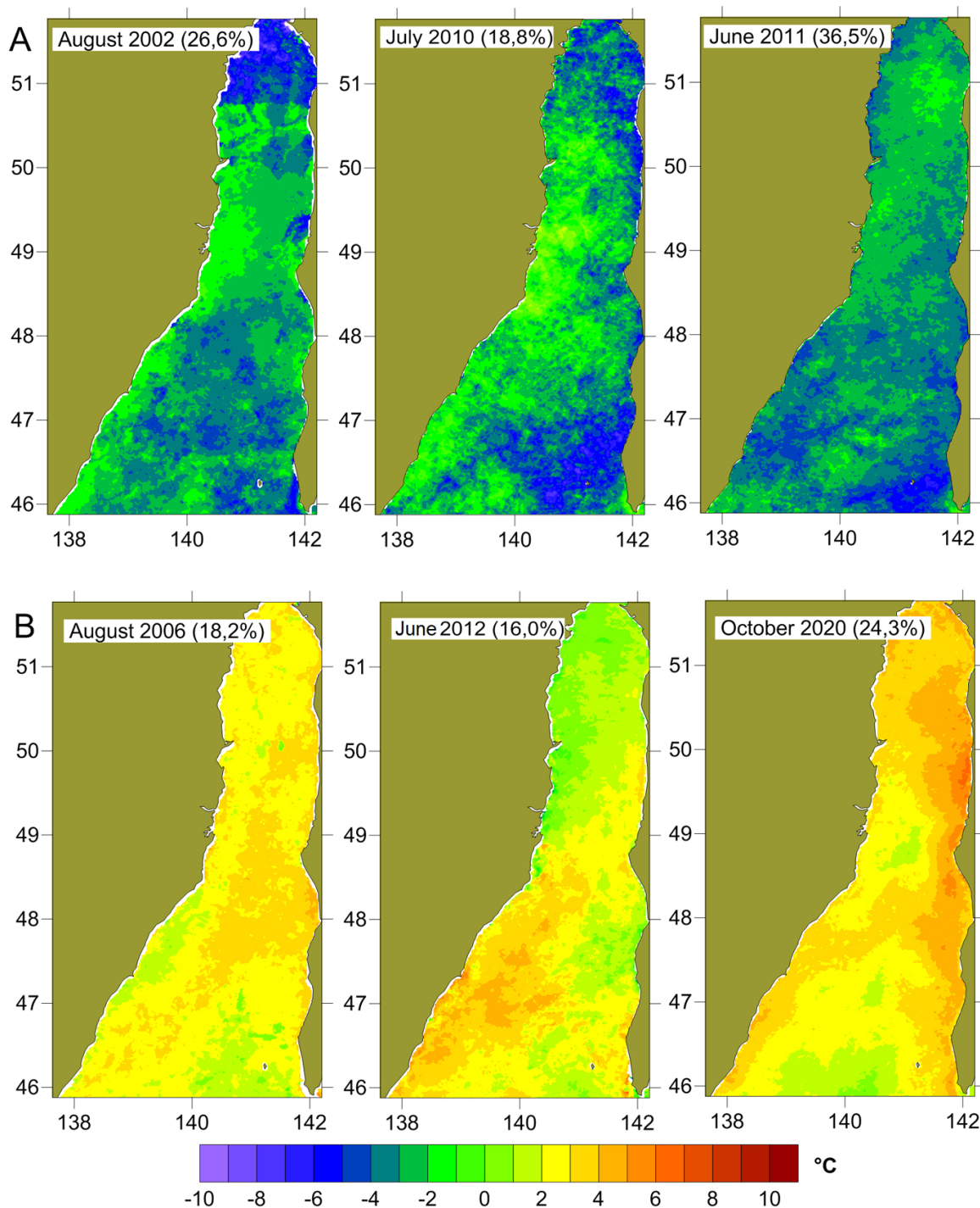


Рис. 6. Пространственное распределение наиболее значительных аномалий ТПМ в «холодные» (А) и «теплые» (В) годы на акватории Татарского пролива.

Fig. 6. Spatial distribution of SST anomalies in "cold" (A) and "warm" (B) years in the waters of the Tatar Strait.

ной части пролива (площадь, на которой отклонения от нормы превышали величину 2σ , занимала около 9.5 % от всей его акватории). Как показано ниже, эта ситуация нашла свое отражение во временных функциях второй и четвертой мод разложения поля ТПМ по ЕОФ.

Значительные положительные аномалии ТПМ наблюдались и в октябре 2020 г., преимущественно вдоль западного побережья о. Сахалин. Их величина составляла 4–5.5 °С, а на участке между Бошняково и Пильво они были особенно выражены (6–6.5 °С). Вдоль побережья материка аномалии несколько меньше, но также существенны (2.5–3.5 °С), несколько меньше они были только в центральной части пролива к югу от 47° с.ш. (1–2 °С). Площадь, на которой отклонения от нормы превысили 2σ , составила около четверти площади Татарского пролива.

Разложение поля ТПМ по ЕОФ

Для определения особенностей сезонной и межгодовой изменчивости применили методику разложения гидрометеорологических полей по естественным ортогональным функциям (ЕОФ [20]). С помощью этой методики анализировали ряды с месячным осреднением по времени. Результаты расчета в виде пространственных распределений 4 основных мод (на их долю приходится 97.37; 1.02; 0.28 и 0.16 % дисперсии ТПМ в Татарском проливе) представлены на рис. 7, а соответствующие

им временные функции – на рис. 8. Пространственные функции полагались безразмерными, а временные – имеющими размерность °С.

При разложении методом ЕОФ гидрометеорологических полей с выраженным сезонным ходом (вариации температуры морской воды или атмосферного воздуха являются одними из наиболее ярких примеров такого рода) первая мода обычно связана с сезонным ходом и дает подавляющий вклад в общую дисперсию параметра, что, однако, не обесценивает роль более высоких составляющих.

Так, пространственная структура первой моды (рис. 7) практически повторяет таковую для усредненного распределения ТПМ в летний период, а ее временная функция имеет очень высокую корреляцию с ходом месячных значений температуры во всем проливе ($r = 0.996$). По этой причине главную составляющую ЕОФ подробно рассматривать нет смысла, отметим только, что временная функция хорошо описывается комбинацией годовой и полугодовой гармоник с амплитудами 0.9 и 0.2 °С, она достигает максимальных значений в августе – сентябре и минимума в феврале – марте.

Первая мода характеризует колебания параметра, которые во всей области происходят синфазно, хотя и с различной интенсивностью на разных ее участках, что описывается пространственной функцией моды.

Вторая мода отражает вариации ТПМ, которые не укладываются в представление об

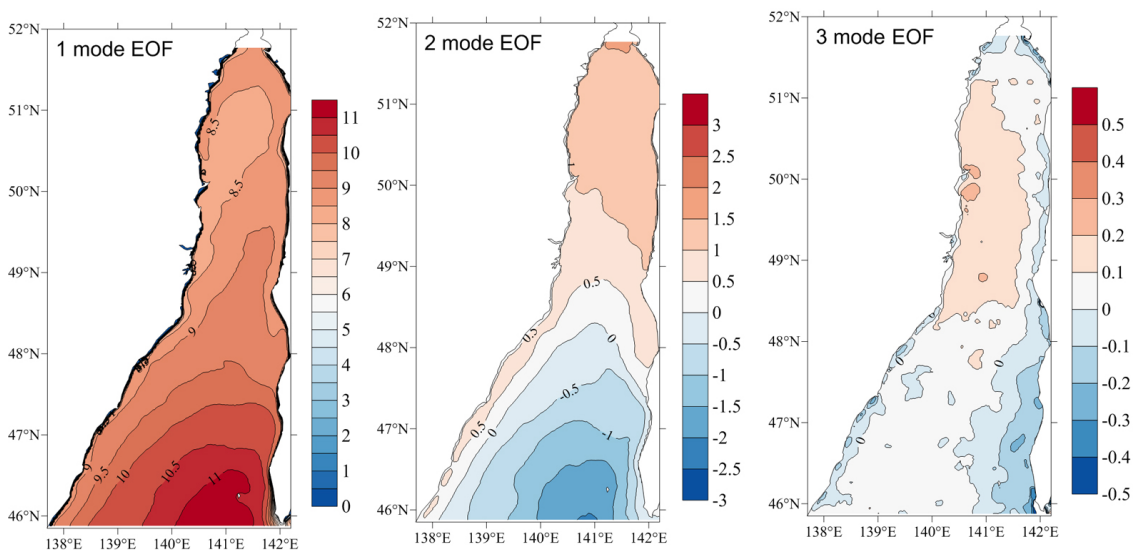


Рис. 7. Пространственное распределение первых трех мод разложения поля ТПМ по ЕОФ (безразмерное).

Fig. 7. Spatial distribution of the first three modes of expansion of the SST field in terms of the EOF (dimensionless).

идентичных в пределах всей области изменения параметра, отражаемых главной модой. Поэтому в пространственном распределении выделяются зоны с различными знаками, которые разделены узловой линией (вблизи нее вклад данной моды незначителен). При этом общий его характер сходен с характером распределения первой моды, это указывает на то, что вторая в чистом виде является поправкой к ней. Положительные значения характерны для мелководных участков северной части Татарского пролива и узких полос вдоль побережья материка и о. Сахалин, максимум 1.5 достигается на севере, вблизи прол. Невельского. Отрицательные значения характерны для зоны влияния Цусимского течения, наибольшие по абсолютной величине (около -2) для южной границы Татарского пролива. Межгодовая изменчивость заключается в модуляции годового хода, она уже была рассмотрена выше.

Усредненная кривая временной функции (средние многолетние значения для разных месяцев) имеет положительные значения в летние месяцы – с июня по сентябрь с максимумом в августе. В остальные месяцы эта функция отрицательна, наибольшие по абсолютной величине значения в ноябре–декабре и марте–апреле. Это означает, что летом вторая мода дает поправку к основной составляющей положительную в северной части пролива и прибрежных зонах и отрицательную в глубоководных южных районах. В холодный период года ситуация обратная: на севере ее вклад отрицательный, в южных районах положительный.

Во временной функции этой моды (графики всех временных функций показаны на рис. 8) заметны значительные межгодовые вариации, при этом годовой ее ход в целом сохраняется. Наибольшие положительные значения (соот-

ветственно, максимальный вклад моды в общее поле ТПМ согласно приведенным выше характеристикам) отмечены в июле 2012 и 2015 гг., августе 2006 г. и сентябре 2017.

Максимальные по абсолютной величине отрицательные значения выявлены в ноябре 2002 и 2005, а также декабре 2013 и 2015 гг.

Третья мода является одной из самых интересных, по ней получены весьма неожиданные

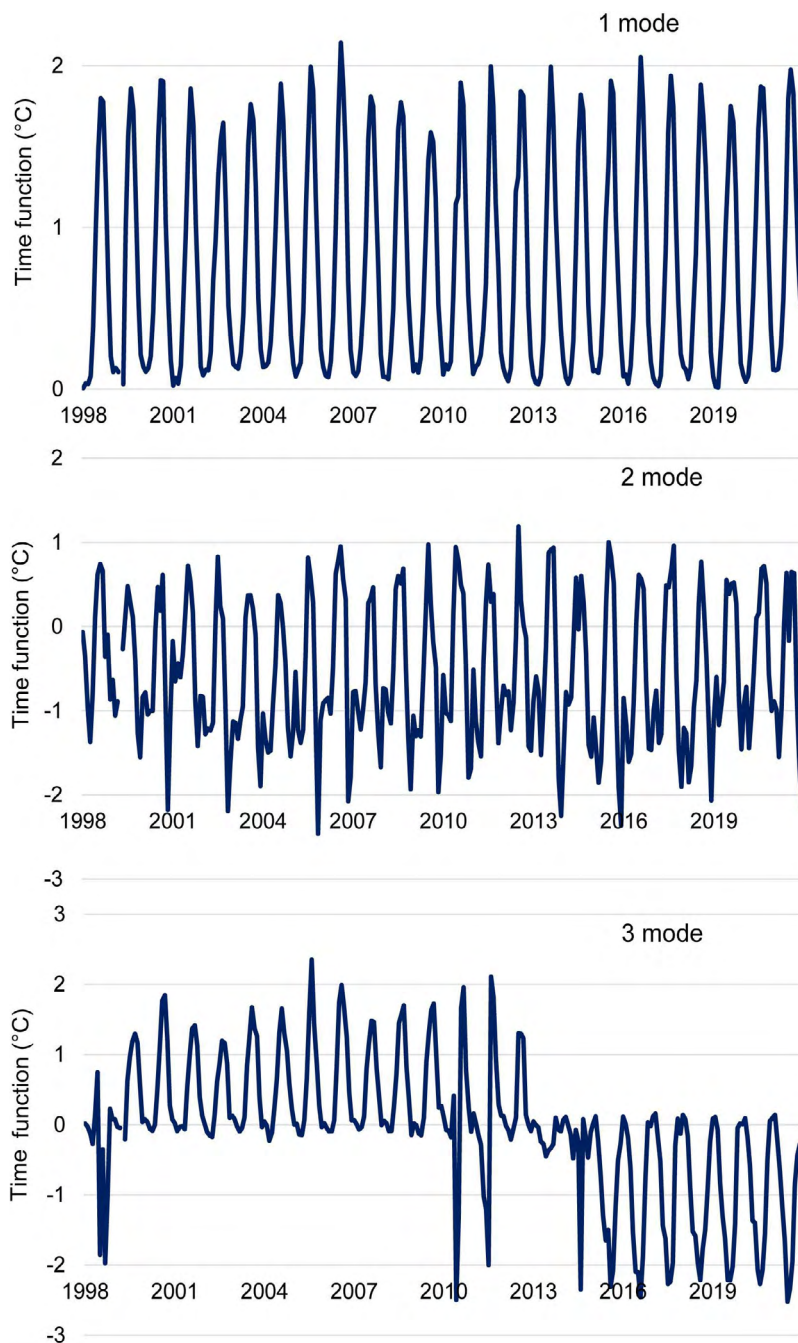


Рис. 8. Графики временных функций первых трех мод разложения поля ТПМ по ЕОФ.

Fig. 8. Graphs of the time functions of the first three modes of expansion of the SST field in terms of the EOF.

ные результаты, на которых стоит остановиться подробнее. Это связано прежде всего с резким изменением характера временной функции, которое относится к 2013–2014 гг. До этого данная функция характеризовалась выраженным сезонным ходом с максимальными значениями в летние месяцы (до $+1.5^{\circ}\text{C}$ в августе) и незначительными отрицательными величинами в зимние (исключение составлял 1998 г. с колебаниями скорее случайного характера). В отмеченные два переходных года летом наблюдались отрицательные, но небольшие по величине значения, но начиная с 2015 г. сезонный ход приобрел обратный характер: в летние месяцы выраженный минимум (до -2.3°C в августе), а в холодный период положительные значения, незначительные по величине. Резко изменилось и среднее значение временной функции, более чем на 1.4°C (с 0.46°C на первом до -0.97°C на втором интервале), что, согласно методике [23], позволяет рассматривать выявленный феномен как «сдвиг режима».

Пространственная функция третьей моды характеризовалась небольшими по величине значениями на основной части акватории пролива. Область с положительными значениями занимала центральный и западный участок северной его части, с максимальными значениями 0.21 – 0.22 в районе мыса Сюркум. Отрицательные величины выявлены в узких прибрежных зонах вдоль побережья Сахалина, а также материка – к югу от широты 48.5° и на самом северном участке. По большей части значения пространственной функции в прибрежье колебались в пределах от -0.07 до -0.15 , и только вблизи прол. Лаперуза они достигали экстремальных показателей до -0.32 .

Это означает, что в период до 2013 г. третья мода обеспечивала положительную поправку к основному полю ТПМ величиной около 0.3°C на северо-западе пролива и отрицательную от -0.15 до -0.4°C в прибрежных акваториях. Начиная с 2015 г. на северо-западном участке акватории поправка в летние месяцы изменяет знак и возрастает по абсолютной величине (до -0.4°C). В прибрежной зоне юго-западного Сахалина она также меняет знак, становится положительной (от 0.2 до 0.6°C на различных участках).

Таким образом, общее изменение ТПМ, обусловленное вкладом третьей моды и свя-

занное с «обращением» ее временной функции в 2013–2014 гг., составляет около 1°C . Для акваторий, прилегающих к западному и юго-западному побережью о. Сахалин, это означает потепление в летние месяцы, с июля по сентябрь. Такое существенное изменение можно рассматривать как «сдвиг термического режима» в восточной части Татарского пролива в 2015–2021 гг. по сравнению с периодом 1999–2012 гг. Этот результат имеет важное прикладное значение: в северной части пролива эти изменения приурочены к традиционной зоне промысловых скоплений нескольких видов креветки, а у юго-западного берега Сахалина – к району, где в последние годы наблюдается существенный рост уловов сельди и мойвы. Этот рост связывается авторами работы [24] с повышением фона температур в данном районе. Отметим, что на данном участке находится также большинство лососевых рыболовных заводов япономорского побережья острова. Выявленный эффект может иметь определенное значение для выживания молоди лососевых рыб на раннем морском этапе их жизни.

Пространственное распределение четвертой моды также интересно, оно имеет зоны разных знаков у восточного и западного берегов пролива (до $+0.6$ и -0.6 соответственно), а узловая линия проходит с севера на юг по его центральной части.

Временная функция этой моды имеет весьма сложный характер, на отдельных интервалах времени в ней явно доминирует годовая гармоника, но в какие-то периоды ее влияние снижается. Привлекает внимание наличие нескольких значительных положительных (июль 2012 и 2013 гг.) и еще более выраженных отрицательных выбросов (октябрь 2001, 2014, 2016 гг., октябрь–ноябрь 2021 г.). О существенных положительных аномалиях в июне и июле 2012 г. упоминалось выше, в первом случае некоторая особенность наблюдалась в графике временной функции первой моды (в виде излома линии), во втором – в виде максимумов временных функций второй и четвертой мод.

Заключение

Расчет усредненных распределений ТПМ по сезонам, а также анализ пространственной функции первой моды ЕОФ показали, что в те-

чение всего года структура распределения ТПМ, характеризующаяся более высокими значениями параметра на юго-востоке акватории и более низкими на северо-западе, сохраняется в целом в течение всего года. Единственным существенным отличием является формирование полосы более холодной воды вдоль западного берега Сахалина (от Александровского залива до Чехово-Ильинского мелководья) осенью. Оно связано с явлением прибрежного апвеллинга, обусловленного ветрами северного и северо-западного румбов, характерными для холодного периода года (зимний муссон). Усредненный годовой ход параметра хорошо описывается комбинацией годовой и полугодовой гармоник с амплитудами около 8.4 и 2 °С, их пространственное распределение на изучаемой акватории однородно.

Расчет коэффициентов линейного тренда выявил тенденцию к понижению температуры поверхностного слоя в Татарском проливе, наиболее выраженную зимой (в северной части бассейна) и весной ($-0.5 \dots -1$ °С/10 лет). Возможно, это связано с увеличением глубины зимней конвекции в традиционно замерзающей части пролива в условиях снижения ледовитости.

Изучение значимых отклонений ТПМ от средних многолетних значений показало, что в этом бассейне формируются значительные аномалии, превышающие удвоенную величину среднеквадратического отклонения параметра в данной ячейке, причем на существенной части его акватории (в 9 случаях более 15 % площади). Количество положительных и отрицательных аномалий было примерно одинаковым. Наиболее часто значимые аномалии наблюдались в северной и юго-восточной частях пролива.

В вариациях усредненных кривых хода ТПМ по различным районам Татарского пролива (а также во временной функции главной моды ЕОФ) выделяются квазициклические колебания с периодом около 6 лет и амплитудой около 1 °С. В результате разложения поля ТПМ по ЕОФ выявлен интересный факт, связанный с резким изменением характера временной функции третьей моды, которое случилось в 2013–2014 гг. До 2013 г. эта функция характеризовалась максимальными значени-

ями в летние месяцы и незначительными отрицательными величинами в зимние, но начиная с 2015 г. сезонный ход приобрел обратный характер. Такие изменения можно характеризовать как климатический сдвиг в изучаемой акватории. Наиболее выражен он в северо-западной части пролива и у юго-западного берега о. Сахалин (около 1 °С). Это обстоятельство может оказывать заметное влияние на состояние популяций нескольких видов креветки и промысловых рыб.

Список литературы

1. *Гидрометеорология и гидрохимия морей*. Т. 8. Японское море. Вып. 1. *Гидрометеорологические условия*. 2003. СПб.: Гидрометеоиздат, 398 с.
2. Веселова Л.Е. 1963. Некоторые особенности температурного режима вод у юго-западного побережья о. Сахалин. *Труды ДВНИГМИ*, 13: 42–63.
3. Дьяков Б.С. 2006. Межгодовая изменчивость циркуляции вод в Татарском проливе в летнее время. *Известия ТИНРО*, 144: 281–299.
4. Дьяков Б.С. 2011. Крупномасштабные колебания в системе океан–атмосфера и перспективы сверхдолгосрочного прогноза температуры воды Японского моря. *Известия ТИНРО*, 165: 231–250. EDN: NYZCZB
5. Зуенко Ю.И. 2009. *Влияние изменений климата на океанологический режим и экосистему Японского моря*: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. СПб.: РГТМУ, 39 с.
6. Пищальник В.М., Архипкин В.С., Леонов А.В. 2009. Восстановление среднемесячных термохалинных полей в Татарском проливе. *Водные ресурсы*, 36(6): 655–667. EDN: KXLFSH
7. Пищальник В.М., Архипкин В. С., Леонов А.В. 2010. О циркуляции вод в Татарском проливе. *Водные ресурсы*, 37(6): 657–670. EDN: NBSUNT
8. Шевченко Г.В., Частиков В.Н. 2006. Сезонные и межгодовые вариации океанологических условий в южной части Татарского пролива. *Метеорология и гидрология*, 3: 65–78. EDN: KUHM RX
9. Шевченко Г.В., Вилянская Е.А., Частиков В.Н. 2011. Сезонная изменчивость океанологических условий в северной части Татарского пролива. *Метеорология и гидрология*, 1: 78–91. EDN: NVYUTH
10. Андреев А.Г. 2018. Особенности циркуляции воды в южной части Татарского пролива. *Исследование Земли из космоса*, 1: 3–11. EDN: YPDQOS
11. Андреев А.Г. 2020. Влияние стока реки Амур и прибрежного апвеллинга на циркуляцию вод в Татарском проливе (Японское море). *Вестник ДВО РАН*, 1: 120–126. doi:10.25808/08697698.2020.209.1.013

12. Шершнева О.В., Шевченко Г.В. **2005**. О прогнозировании термических условий в Сахалино-Курильском регионе по спутниковым данным. *Известия ТИНРО*, 142: 161–187. EDN: HPOKLN
13. Ложкин Д.М., Шевченко Г.В. **2019**. Тренды температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным 1998–2017 гг. *Исследование Земли из космоса*, 1: 55–61. EDN: JVGXWM
14. Покудов В.В., Власов Н.А. **1986**. Температурный режим прибрежных вод Приморья и острова Сахалин по данным ГМС. *Труды ДВНИИ*, 86: 109–118.
15. Ростов И.Д., Рудых Н.И., Ростов В.И., Воронцов А.А. **2016**. Тенденции климатических и антропогенных изменений морской среды прибрежных районов России в Японском море за последние десятилетия. *Известия ТИНРО*, 186: 163–181. EDN: WRJDNP
16. Ростов И.Д., Рудых Н.И., Ростов В.И., Воронцов А.А. **2016**. Проявления глобальных климатических изменений в прибрежных водах северной части Японского моря. *Вестник ДВО РАН*, 5: 100–112.
17. Мороз В.В., Шатилина Т.А., Рудых Н.И. **2021**. Формирование аномальных термических режимов в северной части татарского пролива и Амурском лимане под воздействием атмосферных процессов. *Вестник ДВО РАН*, 6: 101–110.
18. Цыпышева И.Л., Муктепавел Л.С., Цициашвили Г.Ш., Шатилина Т.А., Радченкова Т.В. **2016**. Особенности изменчивости ледовитости в Татарском пролив (Японское море) в связи с региональной атмосферной циркуляцией. *Известия ТИНРО*, 184: 135–149. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-184-135-149>; EDN: WCAMJT
19. Пищальник В.М., Дорофеева Д.В., Минервин И.Г., Шумилов И.В., Никулина И.В. **2019**. Межгодовая динамика аномалий ледовитости Татарского пролива с 1882 по 2018 г. *Известия ТИНРО*, 196: 114–122. EDN: ZAMGXJ
20. Багров Н.А. **1959**. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих. *Труды Центрального института прогнозов*, 74: 3–24.
21. Ложкин Д.М., Шевченко Г.В. **2020**. Циклические вариации температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным в 1998–2018 гг. *Исследование Земли из космоса*, 1: 44–51. doi:10.31857/S0205961420010066; EDN: ADUJGR
22. Цхай Ж.Р., Шевченко Г.В. **2013**. Оценка температурных аномалий поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным. *Исследование Земли из космоса*, 2: 50–61. EDN: PXLIDT
23. Rodionov S.N. **2004**. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophysical Research Letters*, 31(9), L09204. <https://doi.org/10.1029/2004gl019448>
24. Ким С.Т., Ившина Э.Р., Заварзина Н.К. **2022**. Современное состояние сырьевых ресурсов рыб в северо-восточной части Японского моря. *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*, 4: 70–84. doi:10.34078/1814-0998-2022-4-70-84; EDN: LCSGJH

References

1. *Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Vol. 8. The Sea of Japan. Issue 1. Hydrometeorological conditions.* **2003**. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 398 p. (In Russ.).
2. Veselova L.E. **1963**. [Some features of water temperature regime off the southwestern coast of Sakhalin Island]. *Trudy DVNIGMI*, 13: 42–63. (In Russ.).
3. Djakov B.S. **2006**. Year-to-year variability of water circulation in the Tatar Strait in summer. *Izvestiya TINRO*, 144: 281–299. (In Russ.). EDN: HYZCZB
4. Djakov B.S. **2011**. Large-scale fluctuations in the ocean-atmosphere system and prospects of long-term forecasting for water temperature of the Japan Sea. *Izvestiya TINRO*, 165: 231–250. (In Russ.). EDN: OEUPVZ
5. Zuenko Yu.I. **2009**. *Vliyanie izmenenii klimata na okeanologicheskii rezhim i ekosistemu Yaponskogo moray* [Climate change effect on the oceanological regime and ecosystem of the Sea of Japan]: extended abstr. of diss. ... Dr. Sci. (Geographic). SPb.: RGGMU, 39 p. (In Russ.).
6. Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V.S., Leonov A.V. **2009**. Restoration of mean monthly thermohaline fields in Tatar Strait. *Water Resources*, 36(6): 632–644. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/s0097807809060037>
7. Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V. S., Leonov A.V. **2010**. On water circulation in Tatar Strait. *Water Resources*, 37(6): 759–772. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/s0097807810060035>
8. Shevchenko G. V., Chastikov V. N. **2006**. Seasonal and interannual variations of oceanographic conditions in the southern Tatar Strait. *Russian Meteorology and Hydrology*, 3: 49–59. EDN: KUHMXX
9. Shevchenko G. V., Vilyanskaya E. A., Chastikov V. N. **2011**. Seasonal variability of oceanological conditions in the northern part of the Tatar Strait. *Russian Meteorology and Hydrology*, 36(1): 55–64. <https://doi.org/10.3103/s1068373911010080>
10. Andreev A.G. **2018**. Peculiarities of the water circulation in the Southern Tatar Strait. *Izv., Atmospheric and Ocean Physics*, 54(9): 1050–1056. <https://doi.org/10.1134/s0001433818090037>
11. Andreev A.G. **2020**. Impact of the Amur River discharge and coastal upwelling on the water circulation in the Tartar Strait (the Japan Sea). *Vestnik of the FEB RAS*, 1: 120–126. (In Russ.). doi:10.25808/08697698.2020.209.1.013
12. Shersheva O.V., Shevchenko G.V. **2005**. Forecast of thermal conditions in the Sakhalin and Kuril Regions

- on the base of satellite information. *Izvestiya TINRO*, 142: 161 – 187. (In Russ.). EDN: HPOKLH
13. Lozhkin D.M., Shevchenko G.V. **2019**. Trends in the sea surface temperature in the Sea of Okhotsk and adjacent basins based on the satellite data in 1998–2017. *Izv., Atmospheric and Ocean Physics*, 55(9): 1133–1137. <https://doi.org/10.1134/s0001433819090251>
 14. Pokudov V.V., Vlasov N.A. **1986**. [Temperature regime of coastal waters of Primorye and Sakhalin Island according to HMS data]. *Trudy DVNII*, 86: 109–118. (In Russ.).
 15. Rostov I.D., Rudykh N.I., Rostov V.I., Vorontsov A.A. **2016**. Tendencies of climatic and anthropogenic changes of the marine environments in the coastal areas of Russia in the Japan Sea for the last decades. *Izvestiya TINRO*, 186: 163–181. (In Russ.). EDN: WRJDNP
 16. Rostov I.D., Rudykh N.I., Rostov V.I., Vorontsov A.A. **2016**. Expressions of global climatic changes in coastal waters of the northern part of the Sea of Japan. *Vestnik of the FEB RAS*, 5: 100–112. (In Russ.). EDN: XHOEIN
 17. Moroz V.V., Shatilina T.A., Rudykh N.I. **2021**. The abnormally thermal regime forming in the north part of the Tatar Strait and Amur Liman under the influence of atmosphere processes. *Vestnik of the FEB RAS*, 6: 101–110. (In Russ.). doi:10.37102/0869-7698_2021_220_06_10; EDN: ITIPZE
 18. Tsypysheva I.L., Muktepavel L.S., Tsitsiashvili G.Sh., Shatilina T.A., Radchenkova T.V. **2016**. Features of the sea ice cover variability in the Tatar Strait (Japan Sea) in connection with the regional atmosphere circulation. *Izvestiya TINRO*, 185: 135–149. (In Russ.). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-184-135-149>; EDN: WCAMJT
 19. Pishchalnik V.M., Dorofeeva D.V., Minervin I.G., Shumilov I.V., Nikulina I.V. **2019**. Year-to-year dynamics of the ice cover anomalies in the Tatar Strait for the period from 1882 to 2018. *Izvestiya TINRO*, 196: 114–122. (In Russ.). <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2019-196-114-122>; EDN: ZAMGXJ
 20. Bagrov N.A. **1959**. [Analytical representation of a sequence of meteorological fields by means of natural orthogonal components]. *Trudy Tsentral'nogo instituta prognozov*, 74: 3–24. (In Russ.).
 21. Lozhkin D.M., Shevchenko G.V. **2020**. Cyclical variations in the surface temperature in the Sea of Okhotsk and adjacent waters, according to 1998–2018 satellite data. *Izv., Atmospheric and Ocean Physics*, 56(12): 1621–1627. <https://doi.org/10.1134/s0001433820120464>
 22. Tshay Zh.R., Shevchenko G.V. **2013**. Estimation of surface temperature anomalies of the Sea of Okhotsk and adjacent areas based on satellite data. *Izv., Atmospheric and Ocean Physics*, 49(9): 952–962. <https://doi.org/10.1134/s0001433813090223>
 23. Rodionov S.N. **2004**. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophysical Research Letters*, 31(9), L09204. <https://doi.org/10.1029/2004gl019448>
 24. Kim S.T., Ivshina E.R., Zavarzina N.K. **2022**. Current state of fish resources in the northeastern part of the Sea of Japan. *Bull. of the North-East Scientific Center FEB RAS*, 4: 70–84. (In Russ.). doi:10.34078/1814-0998-2022-4-70-84

Об авторах

Шевченко Георгий Владимирович (<https://orcid.org/0000-0003-0785-4618>), доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией океанографии, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО); ведущий научный сотрудник лаборатории цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, shevchenko_zhora@mail.ru

Ложкин Дмитрий Михайлович (<https://orcid.org/0000-0002-7073-681X>), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории океанографии, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО), Южно-Сахалинск

About the Authors

Shevchenko, Georgy V. (<https://orcid.org/0000-0003-0785-4618>), Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Laboratory of oceanography, Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography; Leading Researcher of the Laboratory of tsunamis, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, shevchenko_zhora@mail.ru

Lozhkin, Dmitry M. (<https://orcid.org/0000-0002-7073-681X>), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Laboratory of oceanography, Sakhalin Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Yuzhno-Sakhalinsk

Поступила 12.05.2023
Принята к публикации 3.07.2023

Received 12 May 2023
Accepted 3 July 2023

© The Authors 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© Авторы 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.344.42

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.292-303>
<https://www.elibrary.ru/rcsgya>

Data selection method for restoring a tsunami source form

Tatyana A. Voronina^{@1}, Vladislav V. Voronin²

@ E-mail: tanvor@bk.ru

¹Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

Abstract. The reconstruction of a tsunami source as a solution to the inverse problem in mathematical physics relies on the use of the truncated singular value decomposition method (a variant of the least squares method) for inverting remote records of the tsunami wave. The proposed method allows one to overcome the inevitable instability of the numerical solution. The result of inversion depends on the choice of the observation system, actual bathymetry and data noise level. Within the developed approach, a methodology for choosing key inversion options and an optimal dataset which provide the best accuracy of a tsunami source recovery is discussed. It is based on analyzing the distribution of the specific energy generated by all spatial modes at the locations of the active sensors. The peculiarity of the algorithm is that the use of the most informative data allows one without re-computation of the direct problem to obtain wave amplitudes at the points of interest (let us call them as “fictitious” stations) where there were no observations, but those that were considered in preliminary calculations. Three real-life events, the Chilean Illapel tsunami on September 16, 2015, the tsunami near the Solomon Islands on February 6, 2013, and the Shikotan tsunami on October 5, 1994, are used as examples of the proposed approach. The results obtained allow one hope for using of this approach in practice.

Keywords: inverse ill-posed problem, singular value decomposition, specific energy, numerical modeling

Метод выбора данных для восстановления формы источника цунами

Т. А. Воронина^{@1}, В. В. Воронин²

@ E-mail: tanvor@bk.ru

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Резюме. Восстановление исходной формы источника цунами как решение обратной задачи математической физики основано на использовании метода усеченного сингулярного разложения (вариант метода наименьших квадратов) для обращения удаленных записей волны цунами. Предложенный метод позволяет преодолеть неизбежную нестабильность численного решения. Результат инверсии зависит от выбора системы наблюдения, фактической батиметрии и уровня шума данных. В рамках разработанного подхода обсуждается методика выбора ключевых параметров инверсии и оптимального набора данных, обеспечивающих максимальную точность восстановления формы источника цунами. Метод основан на анализе распределения удельной энергии, генерируемой всеми пространственными модами в местах расположения действующих датчиков. Особенность алгоритма состоит в том, что использование наиболее информативных данных позволяет без повторных расчетов прямой задачи получить амплитуды волн в интересующих точках (назовем их «фиктивными» станциями), где не было наблюдений, но которые были учтены в предварительных расчетах. В качестве примеров применения предлагаемого подхода использованы три реальных события: чилийское цунами Иллапель 16 сентября 2015 г., цунами у Соломоновых островов 6 февраля 2013 г. и Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. Полученные результаты позволяют надеяться на применение данного подхода на практике.

Ключевые слова: обратная некорректная задача, сингулярное разложение, удельная энергия, численное моделирование

Funding and Acknowledgements

The research was supported by the State Budget Program for the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS (no. 0315-2023-0005).

Authors are grateful to the respected Reviewers for their constructive comments and recommendations.

For citation: Voronina T.A., Voronin V.V. Data selection method for restoring a tsunami source form. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 292–303. (In Engl., abstr. in Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.292-303>; <https://www.elibrary.ru/rcsgya>

Introduction

Numerous tsunami observation networks are currently deployed in large tsunami-prone regions, providing a wealth of data for real-time tsunami monitoring. The effectiveness of tsunami warning is an important factor in choosing locations for measuring instruments [1]. In particular, sensor placement for tsunami observation is often associated with historical records in the area of interest, usually confirmed by expert judgments on various decisive factors including technical and financial constraints [2]. Processing of a large amount of data required the use of optimization methods for the number of observations and the optimal time of tsunami warning [3, 4]. Conclusions about the effectiveness of the sensor system are usually based on the analysis of an exhaustive number of synthetic experiments with hypothetical tsunami scenarios, such as in [5].

This paper describes a technique for selecting the optimal data set and inversion parameters. The locations of the most informative sensors are determined based on analyzing the distribution of the specific energy by all spatial modes at the locations of the sensors (the specific energy is an energy per unit volume of fluid). The physics of the deep focus is not considered in this study that is aimed at restoring an initial tsunami waveform when data processing.

The proposed approach is based on our studies of using the truncated singular value decomposition method (a variant of the least squares method) for determining the initial tsunami waveform (often replaced by the tsunami source) by inverting remote records of the transmitted wave [6–8].

Финансирование и благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (№ 0315-2023-0005).

Авторы признательны рецензентам за конструктивные замечания и рекомендации.

As our studies have shown, an increase in the total number of observed records, due to their significant noise level, fails to increase the inversion accuracy for the considered ill-posed problem [8]. On the contrary, by excluding noninformative records we can increase significantly the reliability of source function recovery.

The important feature of developed algorithm is as follows: by using the most informative data, there is no need to re-solve the direct problem with recovered tsunami source. Within solving the direct problem, the theoretical marigrams from model sources should be calculated not only at the locations of the actual sensors, but also at points of interest. We named these points as the “fictitious” stations.

The proposed approach has been tested against three actual events: the Chilean Illapel tsunami on September 16, 2015, the tsunami near the Solomon Islands on February 6, 2013 and the Shikotan tsunami on October 5, 1994. The events in question were triggered by earthquakes with a magnitude of 8.0–8.3, but had significant differences in bathymetry on the path of tsunami waves from the source area to monitoring stations.

The method

A detailed description of the mathematical formulation is presented in [6]. The problem of determining a tsunami source by the known records of a tsunami in a set of remote points is posed as an ill-posed inverse problem of mathematical physics. It is assumed that the tsunami source is a vertical displacement of the ocean floor caused by the main shock of the earthquake

(the piston model of tsunami). The free surface level function $\eta(x, y, t)$ can be found as the solution of the linearized “shallow water” equations with total reflecting boundary conditions on the coast and absorbing boundary conditions on an open sea boundary:

$$\eta_{tt} = \nabla^T (gh(x, y) \nabla \eta) \quad (1)$$

$$\eta|_{t=0} = \varphi(x, y); \quad \eta_t|_{t=0} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \mathbf{n}}|_S = 0; \quad -c\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} - \eta_{tt} + \frac{c^2 \partial^2 \eta}{2\partial \tau^2}|_\Gamma = 0, \quad (3)$$

where $\mathbf{n}$ is the external normal vector to the solid wall, τ is a tangent direction at the boundary, $h(x, y)$ is the smooth function describing the bottom topography, g is the acceleration of gravity, $\mathbf{V} = (\eta_{xt}, \eta_{yt})$ the phase velocity of the wave is defined as $c(x, y) = \sqrt{gh(x, y)}$. The condition of an absolutely reflective solid wall is satisfied on the coastline S . On the so-called open sea boundaries Γ , this algorithm implements the absorbing boundary conditions of the second order of accuracy. The mathematical formulation of the problem under these assumptions consists in determining the initial displacement of the free surface $\eta(x, y, t)|_{t=0} = \varphi(x, y)$ in the area of the tsunami source (the target domain) the rectangle $\Omega = [l_1 \times l_2]$, wherein the values of l_1, l_2 are assumed to be known from the seismic information. The proposed method requires only approximate information about the location of the tsunami source. It is also assumed that oscillations in the level of the free sea surface are known at a certain set of points

$$M = \{(x_i, y_i), i = 1, \dots, P\}: \eta(x, y, t)|_M = \eta_0(x_i, y_i, t).$$

Modeling of direct problem is carried out using a finite-difference approach. Aimed to solve the inverse problem, the unknown function is searched in the form of a finite segment of the Fourier series in spatial harmonics with unknown coefficients $\{c_{mn}\}$:

$$\begin{aligned} \varphi(x, y) &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c_{mn} \sin \frac{m\pi}{l_1} x \sin \frac{n\pi}{l_2} y = \\ &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c_{mn} \varphi_{mn}(x, y) \end{aligned} \quad (4)$$

A similar methodology is employed, e.g., in NOAA [9], where the initial tsunami waveform is

determined via the least residual method applied to a set of known base models.

The problem under consideration is ill-posed, the numerical solution is unstable and, hence, a regularization procedure is required. To this end, the least squares inversion using a truncated singular value decomposition (SVD) method (hereinafter, the r -solution method) was applied. In other words, the regularization of the operator is carried out by restricting the operator to a subspace that is a linear span of the first right singular vectors.

To find the coefficients $\{c_{mn}\}$ a linear system (the “key” system) is constructed:

$$\mathbf{A} \vec{c} = \vec{\eta}_0, \quad (5)$$

where the vector $\vec{c} = \{c_{mn}\}$. To obtain the columns of matrix $\mathbf{A}$, one should numerically solve the direct problem (1)–(3), when every harmonic $\varphi_{mn}(x, y)$ from the sum (4) is used as an initial displacement. In this way, $\mathbf{A}$ is a matrix whose columns consist of the waveforms have been computed at the locations of all active sensors. If one intends to predict the marigrams at points of interest, the marigrams for each harmonic should in addition be calculated at those points, too. Using the notation $\eta_{pj} = \eta(x_p, y_p, t_j)$, one can write the vector $\vec{\eta}_0$ consisting of the observed marigrams in the form: $\vec{\eta}_0 = (\eta_{11}, \eta_{12}, \dots, \eta_{1N_t}, \eta_{21}, \dots, \eta_{2N_t}, \dots, \eta_{P1}, \dots, \eta_{PN_t})$, where $(x_p, y_p), p = 1, \dots, P$ are the finite number of active sensors. The free surface oscillations are assumed to be known for a finite number of times $\{t_j\}, j = 1, \dots, N_t$ in every sensor.

It should be noted that the calculation of the matrix $\mathbf{A}$ is the most time-consuming part of the algorithm.

Next, SVD decomposition is computed for the matrix $\mathbf{A}$ and a generalized normal r -solution of the system (5) approximating the initial tsunami waveform is constructed:

$$\begin{aligned} \varphi^{[r]}(x, y) &= \sum_{j=1}^r \alpha_j \vec{v}_j(x, y) = \\ &= \sum_{j=1}^r \alpha_j \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \beta_{mn}^j \varphi_{mn}(x, y) \end{aligned} \quad (6)$$

Here $\alpha_j = \frac{(\vec{\eta}_0 \cdot \vec{u}_j)}{s_i}$, $\{s_i, \vec{u}_i, \vec{v}_i\}$ are singular numbers, right and left singular vectors of the matrix **A**. The ill-posedness of the problem manifests itself in the rapid decay of the singular values which is limiting the key parameter r of the r -solution (6).

Selecting inversion options

By varying the value of r in formula (6), one can control the instability of the numerical solution. Naturally, with an increase in the value of r , the information content of the resulting r -solution increases, but the numerical stability deteriorates. It is clear that the number r is a key parameter regarding the reliability of the inversion. The value of r is determined by the behavior of the singular spectrum, which in turn depends on the observation system, bathymetry, and the level of noise in the data. Based on numerical experiments with three real-life events, we are going to illustrate

three ways to choose the value of r . First, introduce the notations:

Model 1. Illapel Tsunami on September 16, 2015, observation system: DART buoys (1-2402, 2-32401, 3-32412, 4-32411, 5-43413), $P = 5$; $N_t = 1001$; $\Delta t = 4$ sec; the simulation domain – $102^\circ \text{ W} \leq x \leq 70^\circ \text{ W}$; $12^\circ \text{ N} \leq y \leq 38^\circ \text{ S}$ is shown in Fig. 1 a.

Model 2. Tsunami near the Solomon Islands on February 06, 2013, observation system: DART buoys (1-55012, 2-55023, 3-52403, 4-52402, 5-52406, 6-51425), $P = 6$; $N_t = 1201$; $\Delta t = 4$ sec; the simulation domain – $140^\circ \text{ E} \leq x \leq 185^\circ \text{ E}$, $13^\circ \text{ N} \leq y \leq 17^\circ \text{ S}$ is shown in Fig. 1 b.

Model 3. Shikotan Tsunami on 05.10.1994, observation system, as in [10], the locations of these coastal tide gauges are shown in Fig. 1 c: 1 – Kushiro, 2 – Tokachikou, 3 – Hakodate (Hokkaido Island), as well as 4 – Hachinohe and 5 – Miyako (Honshu Island), $P = 5$; $N_t = 162$ min;

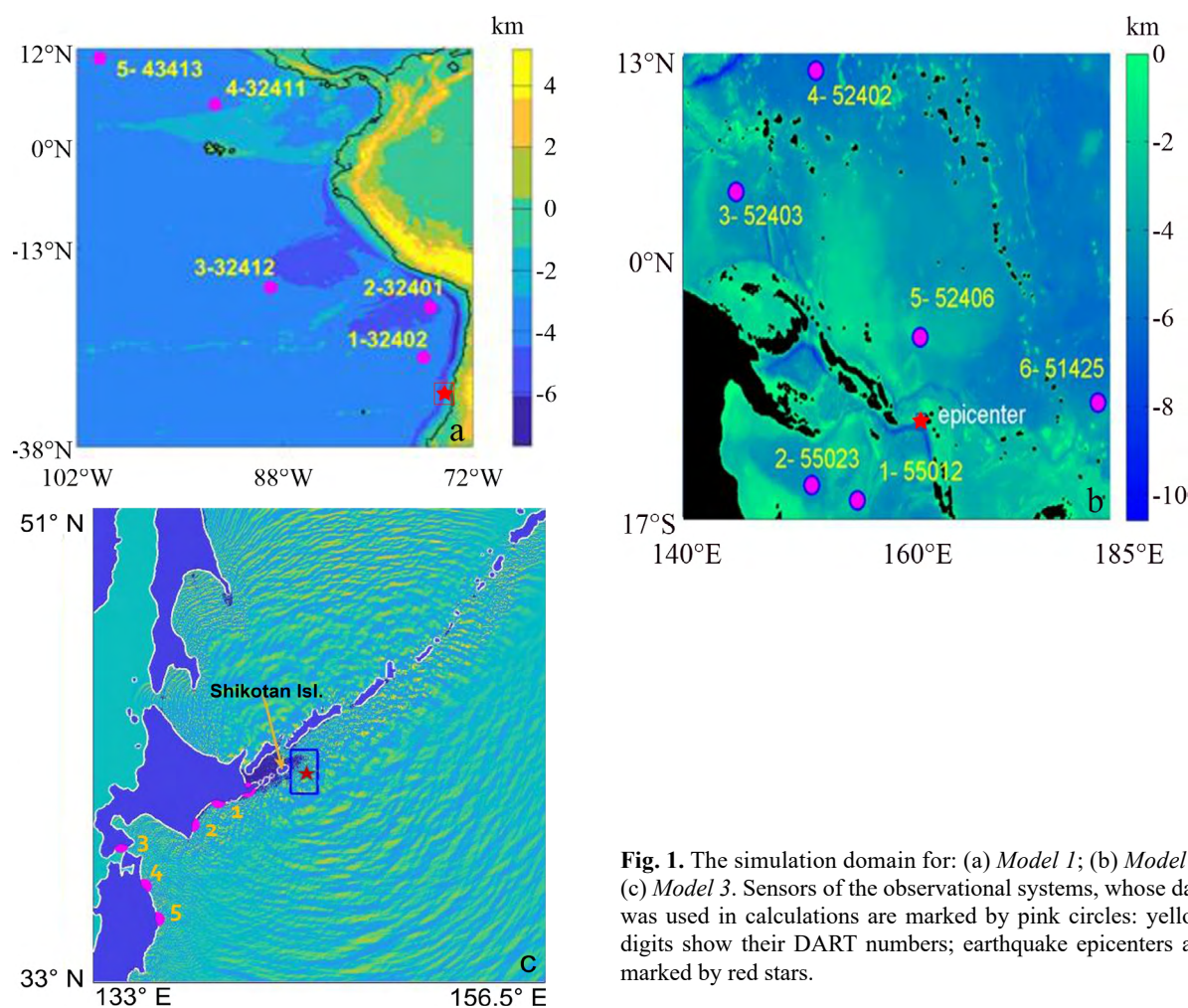


Fig. 1. The simulation domain for: (a) *Model 1*; (b) *Model 2*; (c) *Model 3*. Sensors of the observational systems, whose data was used in calculations are marked by pink circles: yellow digits show their DART numbers; earthquake epicenters are marked by red stars.

the simulation domain: $133^\circ \text{ E} \leq x \leq 156.5^\circ \text{ E}$; $33^\circ \text{ N} \leq y \leq 51^\circ \text{ N}$. The bathymetry used is based on the GEBCO data <http://www.gebco.net>. The data of the Shikotan tsunami are not deep-sea one, also, this data was not synchronized. The locations of the above tide gauges and bathymetry of the western slope of the Kuril-Kamchatka Trench gave a reason to add this event to our study as an experiment. Is it possible to evaluate the information significance of these sensors using proposed approach?

First numerical experiments with model sources, aimed at choosing the “best” observation system, were based solely on the analysis of singular spectra of matrix **A** for different observation systems [8]. The longer the first flat section of the spectrum graph, the larger value of r can be used. Comparing the plots in Fig. 2 a, one can expect that the reconstruction of the tsunami source using the set of sensors {4, 5, 6} will be less successful,

since the nature of the spectrum of the corresponding matrix (the magenta line) allows one to use a significantly lower value of r . This assumption is confirmed within further computations.

It has been found that a smaller set of sensors can provide a more “attractive” spectrum. However, this method turned out to be significantly time-consuming, as it requires iterating over a large number of versions of the observation system. In addition, the choice of the best observation system is complicated if the lines of the spectra are sufficiently similar.

To reduce the search time for an optimal value of r , the following method was proposed in [11]. It is known that the right and left singular vectors form the bases in the solution space and data space, respectively. The components of each right-singular vector $\{\beta_{mn}\}$ are the coefficients at the spatial harmonics in the source function. As-

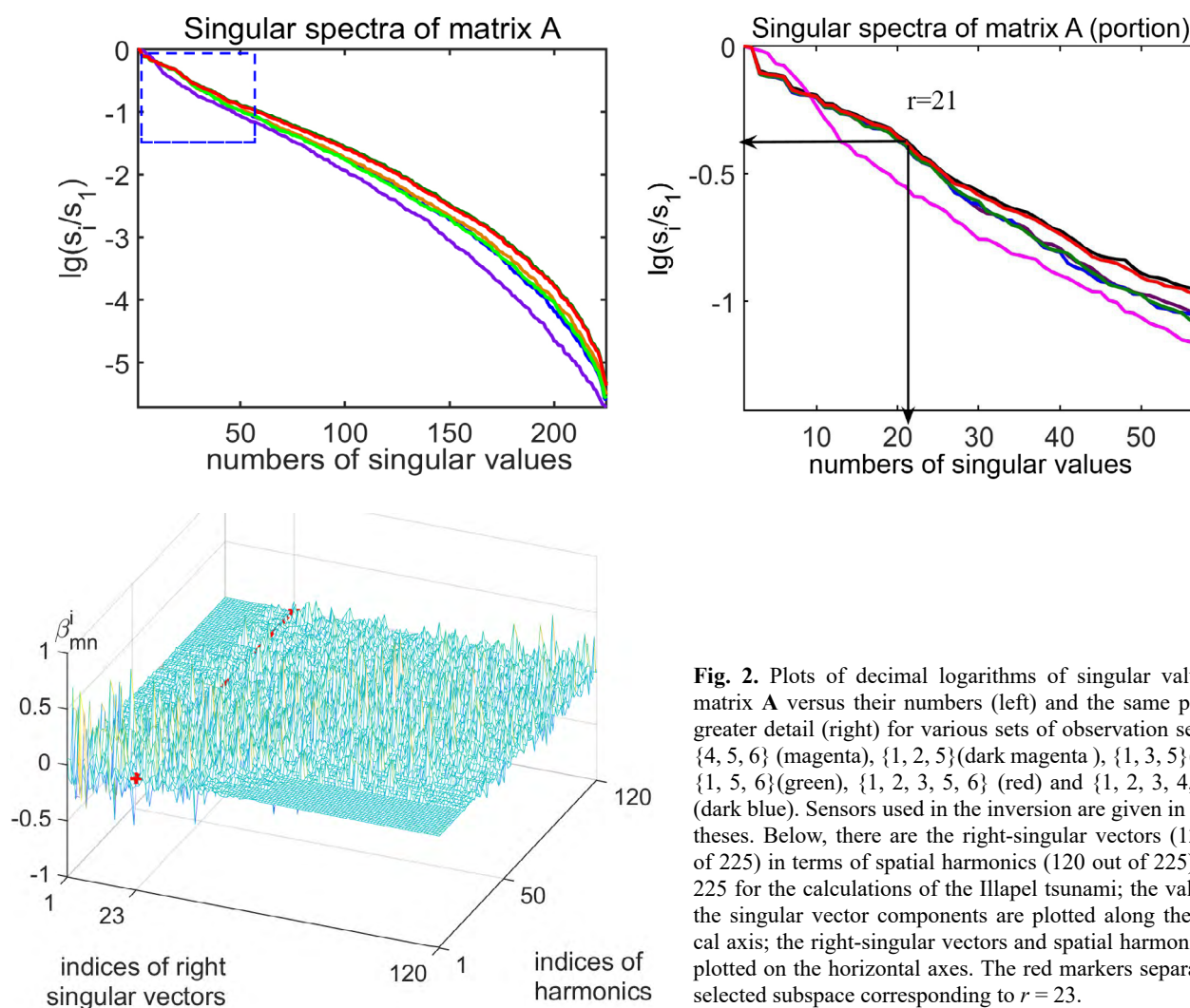


Fig. 2. Plots of decimal logarithms of singular values of matrix **A** versus their numbers (left) and the same plots in greater detail (right) for various sets of observation sensors: {4, 5, 6} (magenta), {1, 2, 5} (dark magenta), {1, 3, 5} (blue), {1, 5, 6} (green), {1, 2, 3, 5, 6} (red) and {1, 2, 3, 4, 5, 6} (dark blue). Sensors used in the inversion are given in parentheses. Below, there are the right-singular vectors (120 out of 225) in terms of spatial harmonics (120 out of 225); total 225 for the calculations of the Illapel tsunami; the values of the singular vector components are plotted along the vertical axis; the right-singular vectors and spatial harmonics are plotted on the horizontal axes. The red markers separate the selected subspace corresponding to $r=23$.

sume the harmonics are numbered in ascending order of $\gamma_{mn} = (m/l_1)^2 + (n/l_2)^2$ (“oscillation index”), where m and n are indices of spatial harmonics l_1, l_2 are sizes of the target domain in longitude and latitude directions, respectively. The large values of the oscillation index correspond to the high-frequency harmonics, causing the appearance of non-physical artifacts in the solution. To avoid this problem, one should use only those right singular vectors in which the high-frequency components corresponding to large γ_{mn} are sufficiently small. Selection of solution subspace by this method for *Model 1* is presented in Fig. 2 b: the red line with the red marker separates those right-singular vectors, whose coefficients at high-frequency harmonics are weakly manifested (here we follow the concept of [11]). To suppress high-frequency components in the solution, one can, for example, set a limit to $r = 23$. For greater accuracy,

one will have to use several values of r . Note that the complete absence of high-frequency components will lead to a loss of amplitude accuracy.

In the course of numerical experiments with model sources ([8]) it turned out that the location of the tsunami monitoring stations in the directions of the “greatest variability” of the source has a significant effect on the quality of inversion. Our subsequent studies with the real-life events shown that the revealed direction coincide with the direction of the most intensive propagation of wave energy. That’s why, a more promising approach seemed to us to analyze the location of the sensors in terms of the accumulation of specific energy. The specific energy is an energy per unit volume of fluid.

The similar approach was employed in [4] for the purpose to infer the parameters of hypothetical tsunami sources, in terms of the fault slip distribution around the Nankai Trough, Japan.

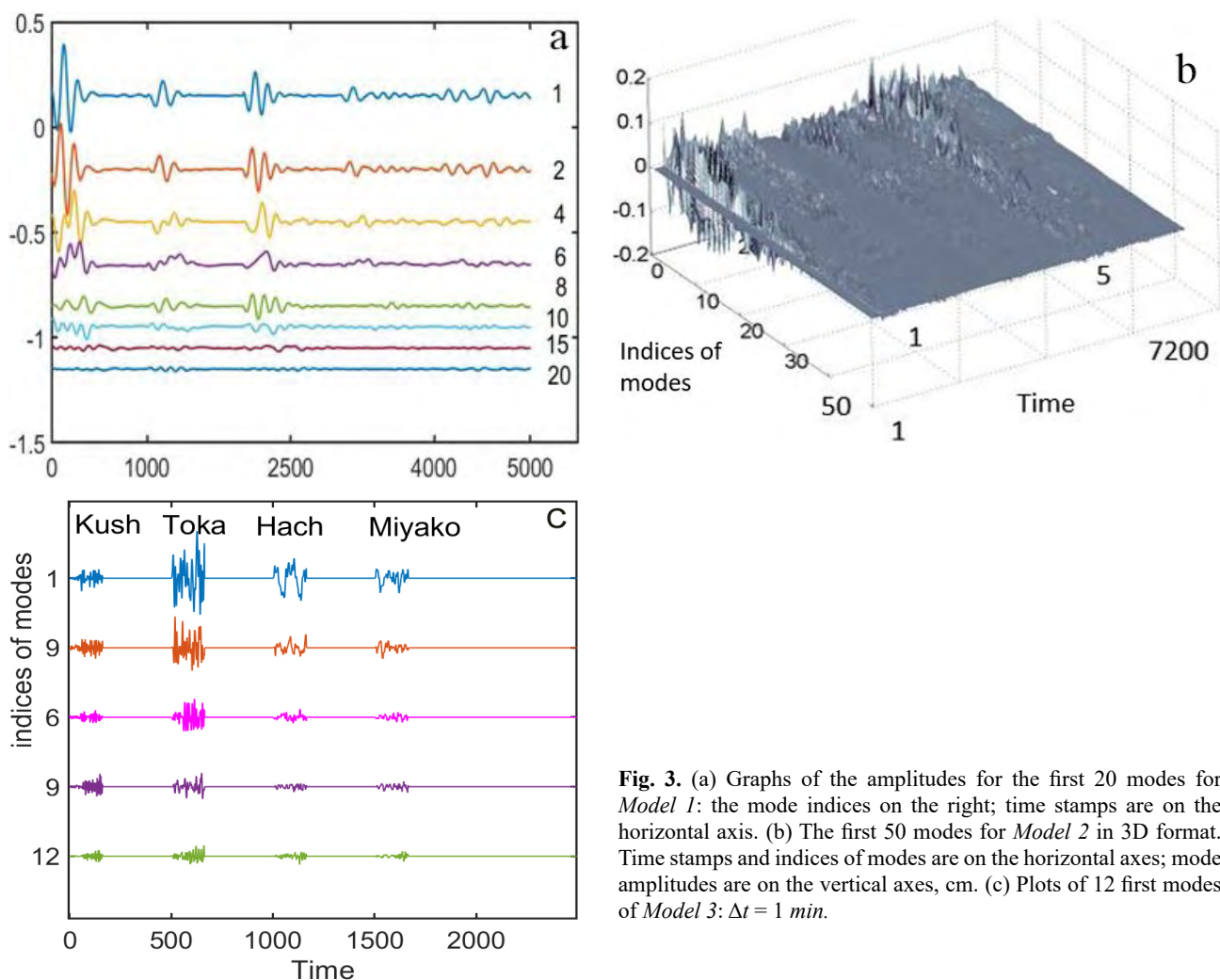


Fig. 3. (a) Graphs of the amplitudes for the first 20 modes for *Model 1*: the mode indices on the right; time stamps are on the horizontal axis. (b) The first 50 modes for *Model 2* in 3D format. Time stamps and indices of modes are on the horizontal axes; mode amplitudes are on the vertical axes, cm. (c) Plots of 12 first modes of *Model 3*: $\Delta t = 1$ min.

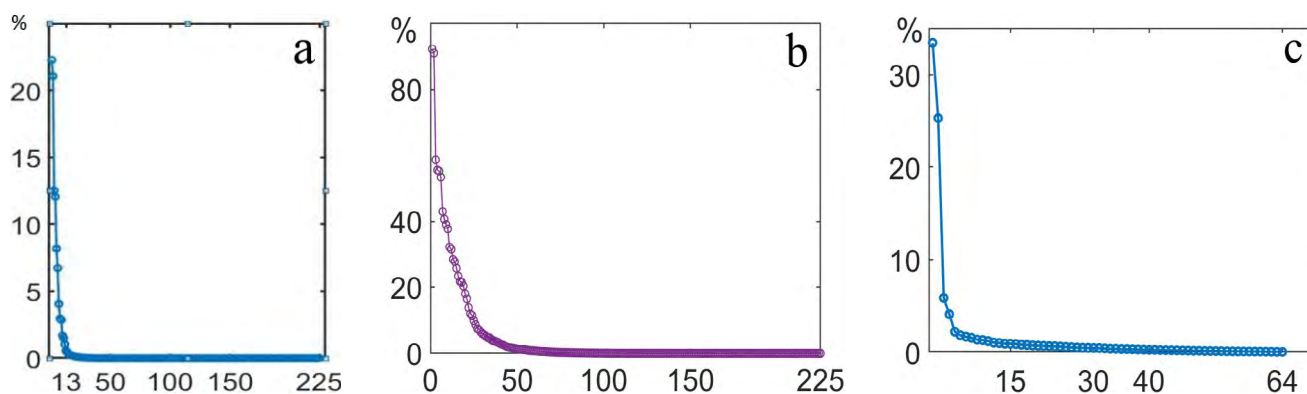


Fig. 4. Distribution of the specific energy vs. spatial mode indices: (a) *Model 1*; (b) *Model 2*; (c) *Model 3*. On the horizontal axes: the mode indices; on the vertical axes: the percentage of specific energy carried by each mode.

In this paper, we discuss a technique for using the distribution of the specific energy between the sensors of the observation system to select the number r . Each right singular vector $\bar{\mathbf{v}}_i$ generates the space $\mathbf{s}_i \bar{\mathbf{u}}_i$ mode according to the SVD formula $\mathbf{A} \bar{\mathbf{v}}_i = \mathbf{s}_i \bar{\mathbf{u}}_i$, $i = 1, M \times N$. The specific energy per mass unit of fluid is proportional to the sum of the squared deviations of the time series (for observed marigrams or for each mode). Considering the sharp decrease in singular values, it can be argued that only the first spatial modes (corresponding to the first singular values) are significant in terms of information (energy) transfer. Decreasing in modes amplitudes with increasing their numbers in the models under consideration is well confirmed in Fig. 3. Namely, the amplitude plots of the first 20 modes for *Model 1* are shown in Fig. 3 a. The first 50 modes for *Model 2* in 3D format are represented in Fig. 3 b. In Fig. 3 c there are 12 spatial modes computed for *Model 3* (note: the 3-Hakodate tide gauge was excluded from the observation system due to insufficient data). The lengths of modes (time-counts with 4 sec intervals) are equal to $5005 = 1001 \times 5$; $7200 = 1200 \times 6$ for the Model 1, 2, and $2000 = 500 \times 4$ (time-counts with 1 min intervals), for the Model 3, respectively.

Another method to determine an upper bound on r is based on analyzing the distribution of the specific energy over all modes. More precisely, the upper limit can be set by determining the number of spatial modes that carry a significant share of the total specific energy. The share of specific energy i -th mode can be characterized

as $s_i^2 / \sum_i s_i^2$. In Fig. 4 the share of specific energy is shown as a function of the mode index i for the considered real-life events. Figure 4 a: *Model 1*, the graph of the distribution of the specific energy over modes. The first 15 modes associated with the maximum singular values carry 80 % of the energy, i.e. $r \leq 15$. Figure 4 b shows the dependence for *Model 2*. The total number of modes is equal to 225. The total shares of the first 21 modes accumulate more than 83 % of the total specific energy, the first 25 modes: more than 88 %. Therefore, this method limits the value of r as $r \leq 25$. For *Model 3*, the total shares of the first 16 modes accumulate more than 90 % of the total specific

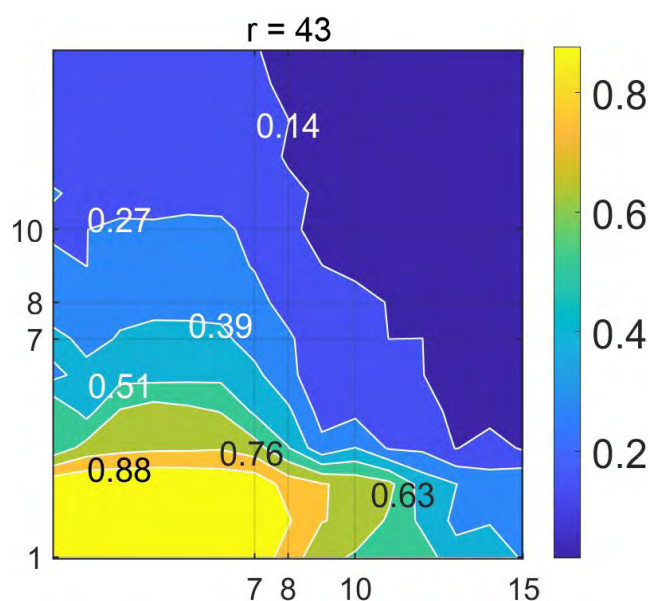


Fig. 5. *Model 1*. The level lines of the projections of the harmonics onto the solution subspace when $r = 43$ and $N = 15$, $M = 15$; indices n is on the horizontal axis; indices m is on the vertical axis.

energy, see Fig. 4 c. This limits the value of $r \leq 16$ when the total number of modes is equal to 64.

Thus, by applying the SVD procedure and analyzing the distribution of the specific energy over modes (in terms of singular values), one can choose a reasonable value of the parameter r for the inversion. After that, one can determine the number of spatial harmonics to be used in the source approximation. As it has been shown in [11], the recovery of high-frequency harmonics strongly depends on the subspace dimension. The smaller r , the more harmonics are not restored and get replaced by numerous “parasitic” harmonics, which leads to the appearance of the artifacts in the solution. To determine the values of M and N , we set a threshold for the projection length of the harmonics onto the solution subspace under consideration. The projection length is calculated as the cosine of the angle of the spatial harmonic with the selected subspace. For example, the iso-lines of these projections onto the subspace with $r = 3$ are shown in Fig. 5 for *Model 1*.

As was established experimentally, the threshold value of the cosine must be at least 0.5, smaller values indicate a weak representation of such harmonic on the selected subspace, i.e., in the solution. On the contrary, an increase in this value leads to a loss of extreme values of the amplitudes. For example, it is clear from Fig. 5 that using harmonics with indices $m \geq 4$ and with indices $n \geq 10$ will lead to the appearance of numerous artifacts in the solution.

Selection of the most “informative” observational data

Based on numerical experiments, we have concluded that a reliable reconstruction of the tsunami source can be reached when the used observation stations supply at least 2/3 of the total specific energy.

Модель 1. The diagram in Fig. 6 a shows that data of the DART buoys 1-32402 and 2-32401 accumulated 71.19 % of the total specific wave

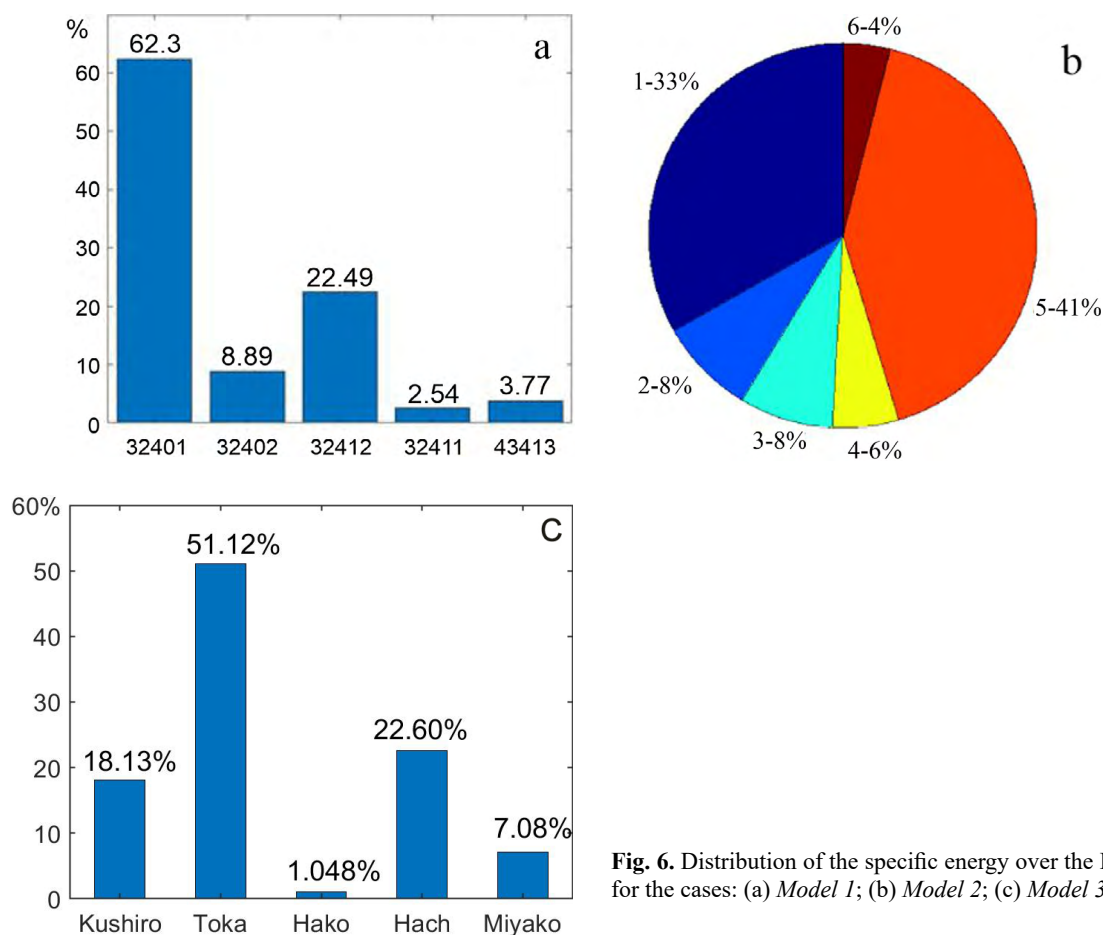


Fig. 6. Distribution of the specific energy over the DART buoys for the cases: (a) *Model 1*; (b) *Model 2*; (c) *Model 3*.

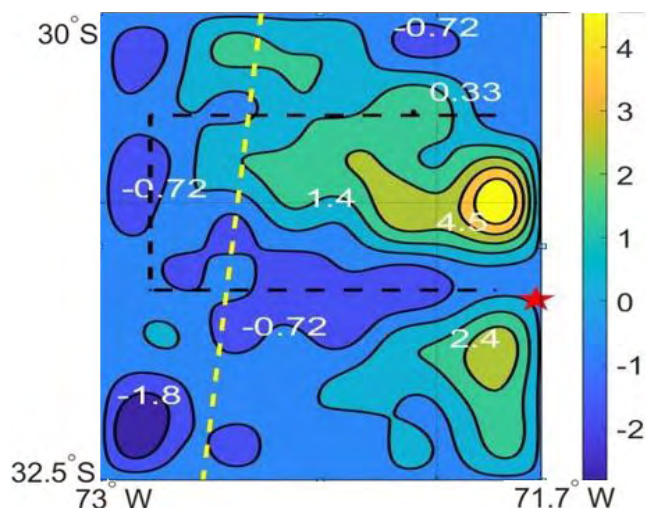


Fig. 7. *Model 1.* The initial sea-surface displacements as inversion result based on the data recorded by DART buoys 1-32402 and 2-32401. Displacement of the sea surface scaled in *m*. On the horizontal and on the vertical axes: there are the longitude and the latitude directions (in degrees), respectively; the yellow dotted line is marking the axis of the Atakama Trench; the epicenter of the earthquake is marked the red star.

energy recorded in the entire observation system. The record of the DART buoy 3-32412 has not been used because it has been corrupted. Data of DART buoys 1-32402 and 2-32401 were defined as the most “informative”. The inversion based on these data allows one to restore the tsunami source with a sufficient accuracy (Fig. 7) that provides a good agreement with the results obtained by other researchers [13].

Moreover, in the above case the wave amplitudes in the locations of the DART buoys 4-32411 and 5-43413 were obtained without repeatedly simulating the wave propagation. One can see in Fig. 8 a good matching between the observed and the computed marigrams in these sensors. As shown in [11], adding data recorded by the DART buoys 4-32411 and 5-43413 to the computational process did not improve the overall in-

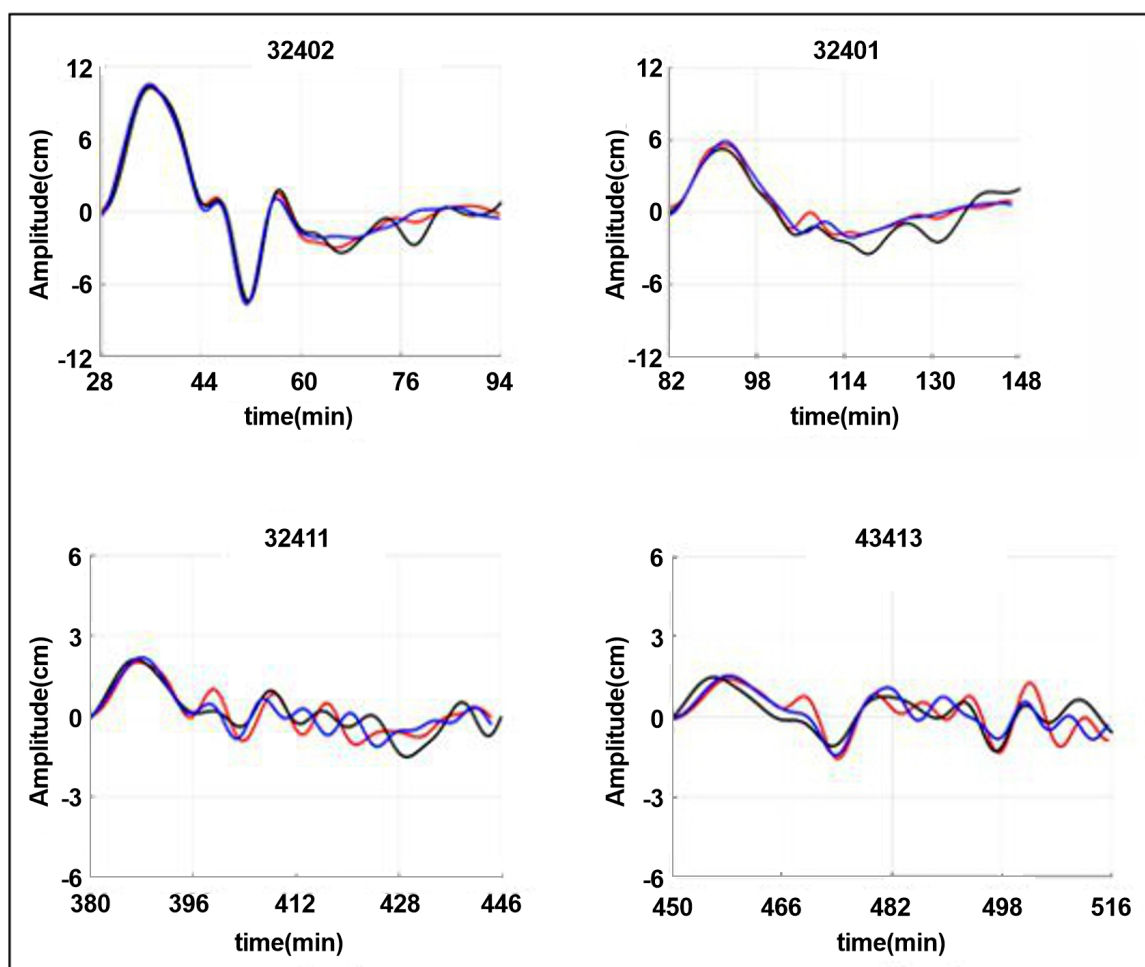


Fig. 8. Comparison of the amplitudes of the observed marigrams (the black lines) and computed ones from the data of DART buoys 1-32402, 2-32401, 3-32412 (the red lines) and data of DART buoys 1-32402 and 2-32401 (the blue lines); on the horizontal axes: time from the beginning of the event (in minutes).

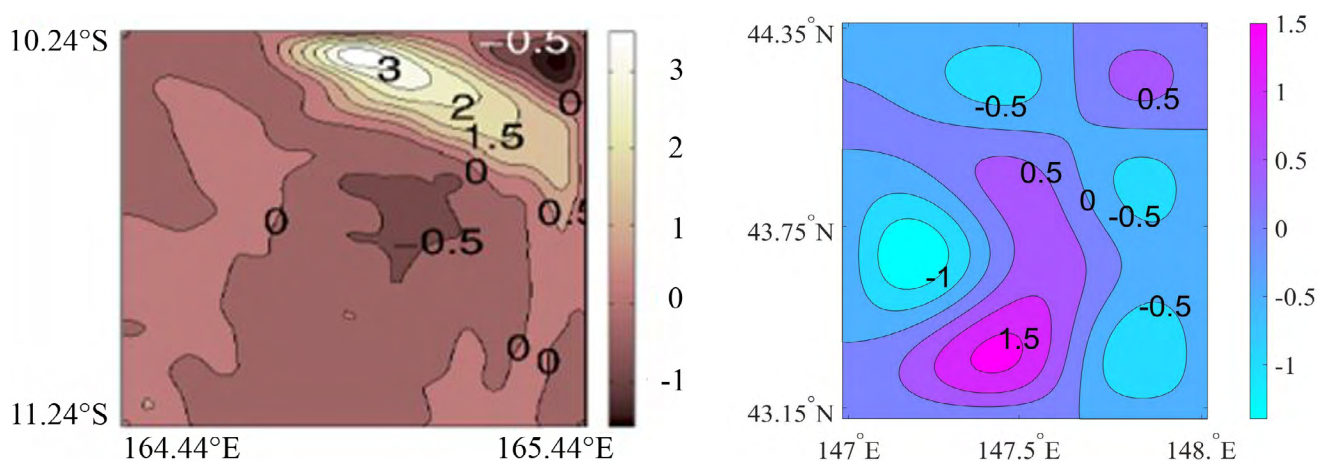


Fig. 9. The initial sea-surface displacements as inversion result based on the data recorded by the stations: (left) *Model 2*: using the DART buoys 1-55012 and 5-52406, $r = 21$; (right) *Model 3*: using the tide gauges 1-Kushiro, 2-Tokachikou, and 5-Miyako, $k_{mx} = 4$; $k_{ny} = 4$; $r = 12$. The sea surface displacement scaled in meters; the longitude and the latitude are along horizontal and vertical axes, respectively.

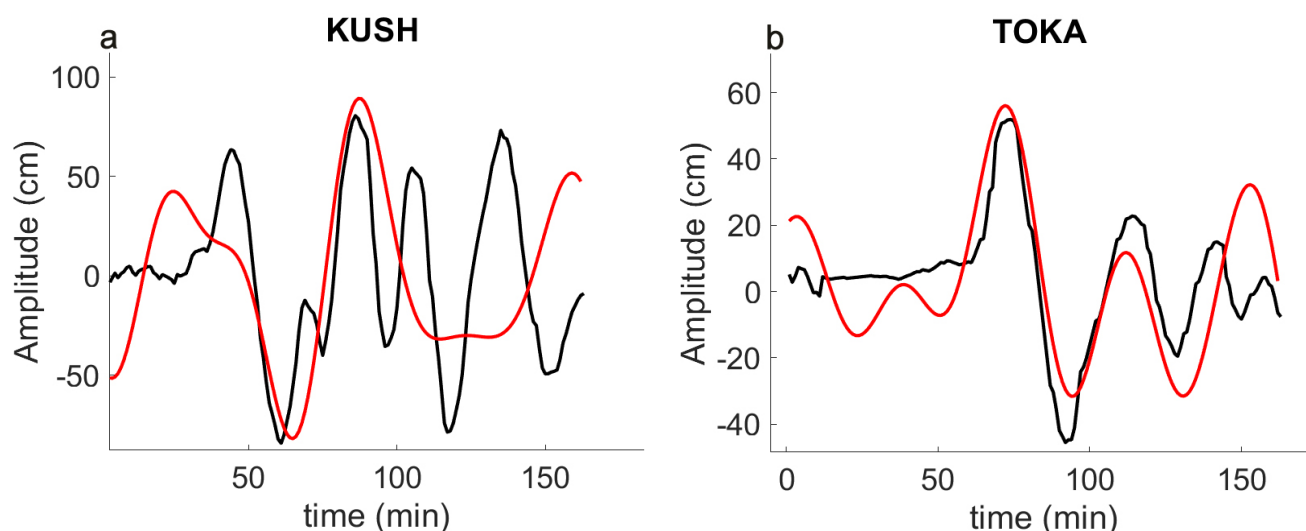


Fig. 10. Comparison of reconstructed (the red lines) and observed marigrams (the black lines) for sensors: (a) 1-Kushiro (has not been used for inversion); (b) 2-Tokachikou (has been used for inversion). Inversion was made with tide gauges data: 2-Tokachikou and 4-Hachinohe; $k_{mx} = 5$; $k_{ny} = 5$; $N_t = 162$ min.

version result that supports the idea of the “most informative” data.

Model 2. Data of DART buoys 1-55012 and 5-52406 were defined as the most informative. As shown in Fig. 6 b, the total specific energy in the locations of these buoys amounted to 74 % of the total energy. The result of the inversion with data generated by these DART buoys is represented in Fig. 9 a. It should be noted that this result will not change if one adds data from the other sensors of the observation system (see [12]).

Model 3. The result of recovering the tsunami source based on data recorded by tide gauges 1-Kushiro, 2-Tokachikou and 5-Miyako is shown

in Fig. 9 b. As follows from Fig. 6 c, using records of Miyako sensor has little effect in the inversion result.

Analyzing the amplitudes of modes in Fig. 3 c, we applied the above methodology to the *Model 3*. The data recorded by the tide gauge 2-Tokachikou should to be define as the most informative. The last is apparently caused by the direction of the source radiation and the nature of the bathymetry of the western slope of the Kuril-Kamchatka Trench. The diagram in Fig. 6 c shows that the data from tide gauges 2-Tokachikou together with 4-Hachinohe, or the data from 2-Tokachikou together with 1-Kushiro accumulate about

2/3 of the specific energy. Thus, the first of the above-mentioned observation systems makes it possible to reconstruct the wave amplitudes at the “point of interest” that it is the Kushiro sensor location, in this case.

The reconstructed marigrams obtained at the locations: 2-Tokachikou (has been used for inversion) and 1-Kushiro (has not been used for inversion), are presented in Figures 10 a and 10 b in comparison with the observed ones.

Conclusion

In order to improve the result of tsunami source inversion based on truncated singular value decomposition method, we proposed a technique for a reasonable choice of the key inversion parameters: the value of r , the number of the spatial harmonics and the most informative observation sensors. The approach based on the distribution of the specific energy of the tsunami wave across the locations of the sensors has shown its efficiency in choosing the most informative data for the recovering a tsunami source. We tested the fast-run algorithm for selecting an optimal tsunami observation dataset against three real-life tsunami events: the Chilean Illapel tsunami on September 16, 2015, the tsunami near the Solomon Islands on February 6, 2013, and the Shikotan tsunami on October 4, 1994. This algorithm is of particular importance in the development of future tsunami warning systems.

The proposed methodology is the following. First, the tsunamigenic zone is covered by a set of target domains. For each of them, the direct problems of wave propagation from the model sources (set of spatial harmonics) are solved. Numerical simulation propagates the model sources up to all sensors of the observation system, including both real-life stations and “fictitious” ones (locations without observations, but with an option for quick calculation of the wave amplitudes). The result of this step is the matrix of key system for each target domain. Second, the dimension of the solution subspace and the associated optimal number of spatial harmonics are determined. Third, an analysis of the distribution of the specific energy

of the wave across the locations of real-life sensors is carried out for each model source. Energy distribution is taken as a basis for selecting the set of the most informative sensors. Finally, the sensor locations defined as the most informative ones for multiple target domains should be considered as top candidates for creating an optimal observation system.

We have demonstrated that the use of the proposed algorithms to determine the key parameters makes it possible to obtain the inversion result with sufficient reliability. Moreover, within the r-resolution method it is possible to obtain rapidly the wave amplitudes at the locations of “fictitious” sensors without solving the direct problem again. The last feature of this approach makes it suitable for real-time tsunami warning.

References

1. Rabinovich A.B., Eblé M.C. **2015**. Deep-ocean measurements of tsunami waves. *Pure and Applied Geophysics*, 172(12): 3281–3312. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1058-1>
2. Omira R., Baptista M.A., Matias L., Miranda J.M., Catita C., Carrilho F., Toto E. **2009**. Design of a sea-level tsunami detection network for the Gulf of Cadiz. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9: 1327–1338. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1327-2009>
3. Spillane M.C., Gica E., Titov V.V., Mofjeld H.O. **2008**. Tsunameter network design for the US DART arrays in the Pacific and Atlantic Oceans. *NOAA Technical Memorandum OAR PMEL*, 143 (165 p.).
4. Mulia I.E., Gusman A.R., Satake K. **2017**. Optimal design for placements of tsunami observing systems to accurately characterize the inducing earthquake. *Geophysical Research Letters*, 44. <https://doi.org/10.1002/2017gl075791>
5. Mulia I.E., Satake K. **2021**. Synthetic analysis of the efficacy of the S-net system in tsunami forecasting. *Earth, Planets and Space*, 73(1): 36. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01368-6>
6. Voronina T.A., Romanenko A.A. **2016**. The new method of tsunami source reconstruction with r-resolution inversion method. *Pure and Applied Geophysics*, 173(12): 4089–4099. <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1286-z>
7. Voronina T.A. **2016**. Recovering a tsunami source and designing an observational system based on an r-resolution method. *Numerical Analysis and Applications*, 9(4): 267–276. <https://doi.org/10.1134/S1995423916040017>

8. Voronin V.V., Voronina T.A., Tcheverda V.A. **2015**. Inversion method for initial tsunami waveform reconstruction. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15: 1251–1263. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1251-2015>
9. Percival D.B., Denbo D.W., Eble M.C., Gica E., Mofjeld H.O., Spillane M.C., Tang L., Titov V. **2011**. Extraction of tsunami source coefficients via inversion of DART buoy data. *Natural Hazards*, 58: 567–590.
10. Ivetskaya T.N., Shevchenko G.V. **1997**. Spectral analysis for Shikotan tsunami records (October 5, 1994). In: *Manifestations of certain tsunami. 1993 and 1994 Tsunami on the Russian coast*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS, p. 105–118. (In Russ.).
11. Voronina T.A., Voronin V.V. **2021**. A study of implementation features of the r-solution method for tsunami source recovery in the case of the Illapel Tsunami 2015. *Pure and Applied Geophysics*, 178: 4853–4863. doi:10.1007/s00024-021-02843-7
12. Voronina T.A., Voronin V.V. **2022**. Selecting the most informative set of the deep-ocean tsunami sensors based on the r-solution method. *Numerical Methods and Programming*, 23: 230–239. (In Russ.). doi:10.26089/NumMet.v23r314
13. Satake K., Heidarzadeh M.A. **2017**. Review of source models of the 2015 Illapel, Chile earthquake and insights from tsunami data. *Pure Applied Geophysics*, 174: 1–9. doi:10.1007/s00024-016-1450-5

About the Authors

Voronina, Tatyana A. (<https://orcid.org/0000-0002-3566-6203>), Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Tsunami Laboratory, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, tanvor@bk.ru

Voronin, Vladislav V. (<https://orcid.org/0000-0002-1727-1873>), Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Higher Mathematics Chair, Department of mathematics and mechanics, Novosibirsk State University, Novosibirsk, vladvor48@bk.ru

Об авторах

Воронина Татьяна Александровна (<https://orcid.org/0000-0002-3566-6203>), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории математического моделирования волн цунами, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, tanvor@bk.ru

Воронин Владислав Владимирович (<https://orcid.org/0000-0002-1727-1873>), кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики ММФ, Новосибирский государственный университет, Новосибирск, vladvor48@bk.ru

Поступила 20.08.2023

Принята к публикации 11.09.2023

Received 20 August 2023

Accepted 11 September 2023

© Авторы 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 531.39

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.304-315>
<https://www.elibrary.ru/aotwnz>

Исследование по динамике многоэтажных зданий

П. Г. Великанов^{@1,2}, Ю. П. Артюхин²

@ E-mail: pvelikanov@mail.ru

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
Казань, Россия

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Резюме. Проектирование многоэтажных зданий – актуальная задача развития современного мегаполиса. Получение точных решений при исследовании собственных и вынужденных колебаний зданий в рамках модели сплошной однородной среды (механика сплошных сред) с бесконечным числом степеней свободы часто труднореализуемо. Поэтому в статье (в рамках модернизации метода конечных элементов) модель многоэтажного здания дискретизируется и наделяется конечным числом степеней свободы, размещенным в серединах конечных элементов в узлах (там же размещают и массу конечных элементов), которые упруго взаимодействуют с конечными элементами модели, не имеющими массы. Предполагается, что элементы многоэтажного здания работают только на изгиб, что вполне оправдывается сопоставлением частот его изгибных и продольных колебаний. Разрешающая система дифференциальных уравнений колебаний многоэтажного здания, в которую в квадратурах записаны выражения для энергий (потенциальной, кинетической и Релея), получена с помощью уравнений Лагранжа 2-го рода. В статье с использованием функций Грина, матриц жесткости, масс, податливости и др. решены задачи о свободных колебаниях 3- и 100-этажных зданий. Полученные в статье результаты при их сравнении с точными решениями, реализованными с помощью прямого и непрямого методов граничных элементов, а также с другими малоизвестными численными решениями показали хорошее соответствие.

Ключевые слова: колебания многоэтажных зданий, частоты колебаний, функция Грина, матрица жесткости, матрица масс, матрица податливости

Research on the dynamics of multi-storey buildings

Peter G. Velikanov^{@1,2}, Yuri P. Artyukhin²

@ E-mail: pvelikanov@mail.ru

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

² Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Abstract. The design of multi-storey buildings is a natural trend in the development of a modern metropolis. Obtaining exact solutions when studying their own and forced oscillations within the framework of a continuous homogeneous medium model (continuum mechanics) with an infinite number of degrees of freedom is often difficult to implement. Therefore, in the article (as part of the modernization of the finite element method), the model of a multi-storey building is discretized and endowed with a finite number of degrees of freedom placed in the middle of the finite elements at the nodes (the mass of finite elements is also placed there), which elastically interact with the finite elements of the model that do not have mass. It is believed that the elements of a multi-storey building work only for bending, which is fully justified by comparing the frequencies of its bending and longitudinal oscillations. The resolving system of differential equations of oscillations of a multi-storey building, in which expressions for energies (potential, kinetic and Rayleigh) are written in quadratures, is obtained using Lagrange equations of the second kind. In the article, the problems of free oscillations of 3- and 100-storey buildings are solved using Green's functions, stiffness, mass, compliance matrices, etc. The approximate results obtained in the article, when compared with the little-known approximate results obtained by other methods, as well as exact results (direct and indirect methods of boundary elements), showed a good correspondence.

Keywords: oscillation of multi-storey buildings, oscillation frequencies, Green's function, stiffness matrix, mass matrix, compliance matrix

Для цитирования: Великанов П.Г., Артюхин Ю.П. Исследование по динамике многоэтажных зданий. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 3, с. 304–315. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.3.304-315>; <https://www.elibrary.ru/aotwnz>

For citation: Velikanov P.G., Artyukhin Yu.P. Research on the dynamics of multi-storey buildings. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 304–315. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.3.304-315>; <https://www.elibrary.ru/aotwnz>

Введение

Данная статья по исследованию динамики многоэтажных зданий является логическим продолжением статьи авторов [1], в которой рассматривалась динамика рамных конструкций.

К числу наиболее сложных объектов современного строительства относятся высотные здания, поэтому основные рекомендации по их проектированию принимаются согласованно международными общественными организациями архитекторов и инженеров: IABSE – ASCE и CIB. В настоящее время сооружения высотой до 30 м отнесены к зданиям повышенной этажности, до 50, 75 и 100 м – к I, II и III категориям многоэтажных зданий соответственно, свыше 100 м – к высотным зданиям [2–5].

Исследование в статье свободных колебаний многоэтажных зданий реализовано с помощью сравнения точного решения (в данном случае ими выступали прямой (метод взвешенных невязок) и непрямой (метод компенсирующих нагрузок) методы граничных элементов (МГЭ) [6–8]) с численными решениями: вместо метода конечных элементов, где узлы конечных элементов рамных конструкций размещены на их границах, была использована его модернизация (массу конечных элементов помещают в их середине и называют узлами, которые упруго взаимодействуют с элементами многоэтажных зданий, не имеющими массы). В основу МГЭ (метод граничных интегральных уравнений, метод теории потенциалов) положен переход от системы дифференциальных уравнений и граничных условий к их интегральному аналогу на границах области. Процедура решения включает дискретизацию границ области совокупностью (ансамблем) граничных элементов, применение различных вариантов аппроксимации геометрии границ и граничных функций, замену исходного интеграль-

ного соотношения дискретным аналогом для формирования системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), посредством решения которых определяются дискретные значения неизвестных функций в узловых точках на границе области.

В настоящее время наиболее распространена следующая методика получения элементов матрицы податливости (коэффициентов влияния): подобно тому как в статически неопределимых задачах сопротивления материалов для реализации метода сил формировалась каноническая система, к каждой из центрально расположенных в конечном элементе масс, на которые действуют внешние силы, прикладывают единичную силу и отдельно для каждой единичной силы строят эпюру изгибающих моментов; затем по правилу Верещагина или Симпсона находят искомые элементы матрицы. В данной статье для определения элементов матрицы податливости была использована как вышеописанная классическая методика, так и методика, позволяющая найти искомые элементы через функцию Грина. Найденные элементы матрицы податливости оказались идентичными, но затраченных усилий для их получения с помощью функции Грина, как показано, например, в [1], оказывается меньше.

Авторы исходят из предположения, что элементы многоэтажного здания работают только на изгиб. Продольные перемещения многоэтажного здания не учитываются, так как частота продольных колебаний на два порядка выше частоты изгибных колебаний. Такая модель приводит к составлению выражений кинетической и потенциальной энергии, что позволяет затем с помощью уравнений Лагранжа 2-го рода получить систему дифференциальных уравнений колебаний многоэтажных зданий. В статье с использованием функций Грина, матриц жесткости, масс, податливости и др. решены задачи о свободных колебаниях 3- и 100-этажных зданий.

1. Постановка и решение задач

Переходя от задач механики сплошных сред с бесконечным числом степеней свободы после дискретизации (конечно-элементной, гранично-элементной и т.д.) к задачам с конечным числом степеней свободы, как показано в [1], кинетическая, потенциальная энергии, а также энергия Релея для механической системы с n степенями свободы могут быть представлены в виде квадратичных функций

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} \dot{x}_i \dot{x}_j; \quad \Pi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} x_i x_j; \quad Rel = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij} \dot{x}_i \dot{x}_j, \quad (1.1)$$

где $x_i, \dot{x}_i$ – поперечные перемещения и скорости перемещений сосредоточенных масс сооружений; m_{ij}, k_{ij}, r_{ij} – компоненты матриц масс $[M]$, жесткости $[K]$ и рассеивания $[R]$ соответственно.

Введя вектор-строку $(x) = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и соответствующий ему после операции транспонирования вектор-столбец $\{x\}$, квадратичные функции энергий удалось представить в матрично-векторной форме. Использование в уравнении Лагранжа 2-го рода квадратичных функций энергий в матрично-векторной форме позволило путем дифференцирования получить систему дифференциальных уравнений колебаний системы с n степенями свободы в виде [9]:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [R]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{P\}, \quad (1.2)$$

где $\{P\} = (P_1, P_2, \dots, P_n)^T$ – вектор-столбец внешних нагрузок, приложенных к массам.

Рассматривая свободные колебания без учета рассеивания энергии, уравнение (1.2) примет вид (частное решение ищем в виде $\{x\} = \{B\}e^{i\omega t}$, причем $\{B\} = (B_1, B_2, \dots, B_n)^T$ – произвольный вектор-столбец):

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0. \quad (1.3)$$

Тогда задача после подстановки частного решения сводится к решению системы однородных уравнений относительно амплитуд B_k :

$$([K_1] - \lambda[M_1])\{B\} = 0; \quad \lambda = \frac{\omega^2 l^3 m}{d}; \quad [M] = m[M_1]; \quad [K] = \frac{d}{l^3}[K_1], \quad (1.4)$$

где $[M_1], [K_1]$ – безразмерные матрицы масс и жесткости соответственно; ω – частота колебаний; l – длина произвольного элемента; d – изгибная жесткость произвольного элемента; m – стандартная сосредоточенная масса, приложенная в середине элемента.

В некоторых случаях представления матриц в (1.3) и (1.4), описанных в [1], задача об определении собственных колебаний может быть эффективно решена с помощью прямого и обратного подходов.

Общее решение уравнения (1.3) запишем в виде [10, 11]:

$$x_i = \sum_{s=1}^n A_s \varphi_{is} \sin(\omega_s t + \alpha_s),$$

где φ_{is} – элементы модальной матрицы (амплитуд собственных форм колебаний) $[\varphi_{is}] = [Q]$, α_s – сдвиг фазы, ω_s – частота свободных колебаний; A_s, α_s – произвольные постоянные, которые определяются из начальных условий для отклонений x_{i0} и скоростей $\dot{x}_{i0}$ из системы $2n$ уравнений:

$$x_{i0} = \sum_{s=1}^n A_s \varphi_{is} \sin \alpha_s; \dot{x}_{i0} = \sum_{s=1}^n A_s \omega_s \varphi_{is} \cos \alpha_s.$$

Формы колебаний φ_{is} не зависят от начальных условий движения, но влияют только на постоянные A_s и α_s . Более удобным является другой вид общего решения с произвольными постоянными A_s, C_s :

$$x_i(t) = \sum_{s=1}^n \varphi_{is} (A_s \sin \sqrt{\lambda_s} t + C_s \cos \sqrt{\lambda_s} t).$$

Как показано в [1], основная трудность решения задачи колебаний сооружений состоит в определении матрицы податливости $[F] = [\delta_{ik}]$, которая на основе теоремы Максвелла о взаимности перемещений будет симметричной матрицей $\delta_{ik} = \delta_{ki}$. Введем в рассмотрение вектор $\bar{G}^{(k)}(x, \xi)$, называемый вектором Грина. Если записать его проекции, то при переборе $k = 1, 2, 3$ получим тензор Грина $[G_i^{(k)}]$, $i = 1, 2, 3$. Функции $G_i^{(k)}$ называются функциями перемещений Грина.

Применяя теорему Бетти о взаимности работ к двум системам сил, получим теорему Максвелла о взаимности перемещений для сосредоточенных сил (фактически функции перемещений Грина (матрица Грина) есть не что иное, как компоненты матрицы податливости):

$$G_k^{(j)}(x, \xi) = G_j^{(k)}(\xi, x). \quad (1.5)$$

Численная реализация задачи о собственных значениях была успешно реализована с помощью функций пакета символьной математики (ПСМ) «WolframMathematica» [12], перечисленных в [1].

2. Динамика многоэтажного здания

На рис. 1 представлена модель n -этажного здания, межэтажные плиты перекрытия которого предполагаются абсолютно жесткими, а вертикальные стойки гибкими и невесомыми. В результате внешнего воздействия или вибрации грунта боковые перемещения здания определяются горизонтальными смещениями плит w_i , $i = \overline{1, n}$. Так как плиты перемещаются поступательно, то углы поворота колонн в местах сопряжения с межэтажными перекрытиями оказываются нулевыми. Поэтому в рамках такой модели здание деформируется инерционными силами за счет сдвига плит относительно друг друга (рис. 2). Предполагается, что масса i -го этажа m_i сосредоточена в центре плиты и перемещения рамы происходят в ее плоскости. Приращение перемещений i -го этажа зависит от поперечной (перерезывающей) силы Q_i . Для каждого этажа предполагается своя относительная жесткость на сдвиг k_i (рис. 1). Если межэтажные стойки, равные высоте этажа h_i , имеют изгибную жесткость D_i , то изгиб каждой стойки будет состоять из изгиба двух консолей силами $Q_i/2$ (рис. 2) с длинами $h_i/2$. В середине пролета стойки имеется точка перегиба. В результате получаем относительный сдвиг плит [13]:

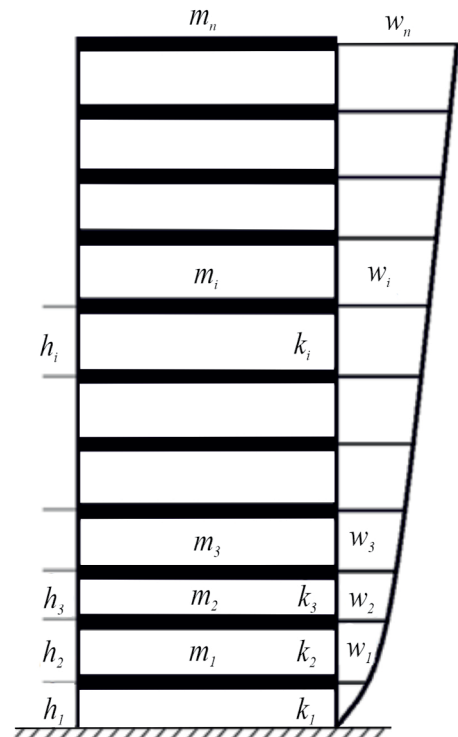


Рис. 1. Модель n -этажного здания.

Fig. 1. Model of an n -storey building.

$$a_i = w_i - w_{i-1} = 2 \left[\frac{\frac{Q_i}{2 \left(\frac{h_i}{2} \right)^3}}{3D_i} \right] = \frac{Q_i h_i^3}{24D_i} = \delta_i Q_i, \quad (2.1)$$

где $\delta_i = \frac{1}{k_i} = \frac{h_i^3}{24D_i}$, $k_i = \frac{24D_i}{h_i^3}$, δ_i – относительная податливость i -й стойки на сдвиг, k_i – относительная жесткость стойки на сдвиг.

В [13] в (2.1) вместо числа 24 записано 12 и указано, что берется суммарный момент инерции колонн этажа. Как оказалось, это отличие никак не влияет на конечный результат.

Матрица масс представляет собой диагональную матрицу, где по главной диагонали расположены массы межэтажных перекрытий.

Построим матрицу податливости на примере трехэтажного здания (рис. 3).

Прикладывая единичную нагрузку $Q = 1$ к первой плите, из (2.1) получим элементы матрицы податливости (прогибы в i -х точках от действия нагрузки в точке 1): $\delta_{11} = G_{11} = a_1 = \delta_{21} = \delta_{31}$.

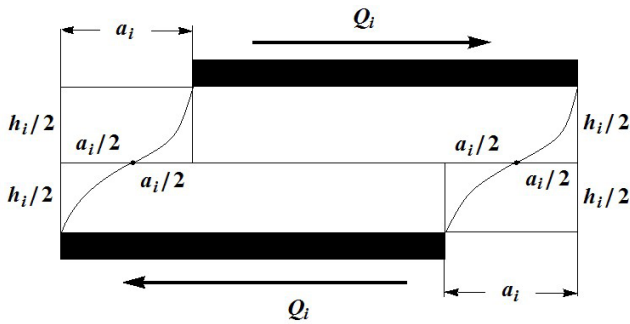


Рис. 2. Сдвиг плит относительно друг друга.

Fig. 2. The shift of the plates relative to each other.

Последние равенства следуют из того, что в точках 2 и 3 отсутствует поперечная сила и не происходит сдвига плит. При переносе единичной нагрузки в точку 2, в точке 1 снова возникнет сдвиг плиты, равный a_1 . А в точке 2 появится дополнительный сдвиг a_2 . Полный прогиб составит

$$\delta_{22} = G_{22} = a_1 + a_2 = \sum_{j=1}^2 a_j = \delta_{32}; \quad \delta_{12} = a_1.$$

Аналогично вычислим остальные элементы матрицы податливости (рис. 3):

$$\delta_{13} = a_1; \quad \delta_{23} = a_1 + a_2;$$

$$G_{33} = \delta_{33} = a_1 + a_2 + a_3 = \sum_{j=1}^3 a_j.$$

Таким образом, можно представить дискретную функцию Грина для i -й плиты при действии единичной поперечной нагрузки на k -ю плиту в виде

$$G_{ik} = \delta_{ik} = \begin{cases} \sum_{j=1}^k a_j, & i \geq k \\ \sum_{j=1}^i a_j, & i \leq k \end{cases}, \quad (2.2)$$

$i, k = 1, 2, 3 \dots n.$

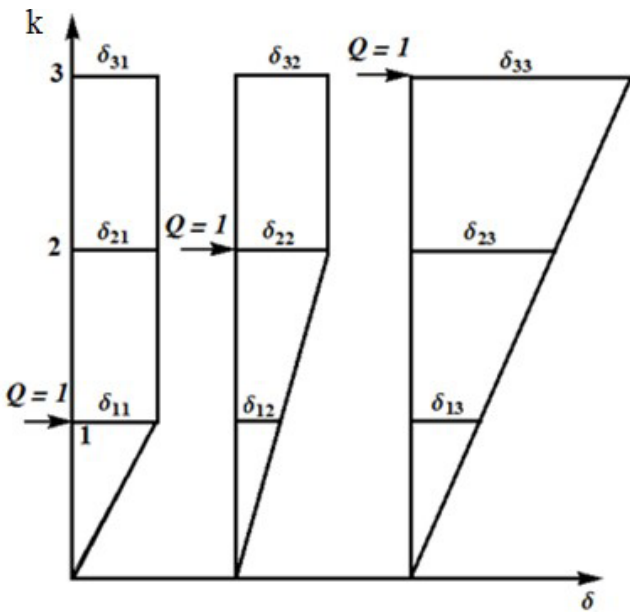


Рис. 3. Пример построения матрицы податливости для трехэтажного здания.

Fig. 3. An example of constructing a compliance matrix for a three-storey building.

Для проверки достоверности формулы (2.2) решим задачу о колебаниях трехэтажного здания при следующих данных: $m_1 = m_2 = m_3 = m$; $h_1 = h_2 = h_3 = h$; $D_1 = 3D$; $D_2 = 2D$; $D_3 = D$.

Согласно (2.2) будем иметь матрицу податливости $[F]$ и ее безразмерный аналог $[F_1]$:

$$[F] = \frac{h^3}{24 D} [F_1]; [F_1] = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{5}{6} & \frac{5}{6} \\ \frac{1}{3} & \frac{5}{6} & \frac{11}{6} \end{bmatrix}.$$

Матрица масс получит выражение

$$[M] = m[E]; [E] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Частотное уравнение запишется следующим образом:

$$\det([F_1] - \lambda_1[E]) = 0; \lambda_1 = \frac{24 D \omega_1^2}{m h^3}, \omega_1^2 = \frac{1}{\omega^2}.$$

Откуда

$$\omega_1^2 = \frac{m h^3 \lambda_1}{24 D}.$$

Вычисляя собственное число λ_1 в ПСМ «WolframMathematica» [12] $\{\lambda_{13}, \lambda_{12}, \lambda_{11}\} = Eigenvalues [F_1]$, получим $\{2.40515, 0.435867, 0.158984\}$.

Коэффициент квадрата обратной частоты равен

$$\beta_i^{-2} = \lambda_1 / 24: \{0.100215, 0.0181611, 0.00662433\}.$$

Аналогичный коэффициент в [13] равен

$$\lambda_{1,2,3} = 14.4 \alpha; 2.62 \alpha; 0.954 \alpha, \left(\alpha = \frac{m h^3}{144 D} \right).$$

Вычисления дают совпадение до 3 знаков: $\{0.1, 0.0181944, 0.006625\}$.

Точные решения, полученные с помощью МГЭ (прямой и не прямой его реализаций), дают отличия от приближенной частоты: 1-я частота на 0.05 %, 2-я на 3.3 %, 3-я на 15.4 %.

Частоты i -го тона вычисляются по формуле

$$\omega_i = \beta_i \sqrt{\frac{D}{m h^3}}; \quad \beta_i = \sqrt{24 \lambda}.$$

Собственные векторы-строки колебаний получены с помощью $\{b_3, b_2, b_1\} = Eigenvectors[F_1]$: $\{-0.214935, -0.492656, -0.843263\}, \{-0.504896, -0.683054, 0.527748\}, \{0.835992, -0.539192, 0.101928\}$ и оказываются ортонормированными с погрешностью вычислений ПСМ «WolframMathematica» [12].

$\Lambda = 1/\lambda_1$ – собственное число, вычисленное по матрице жесткости:

$$\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\} = \{0.415775, 2.29428, 6.28995\}.$$

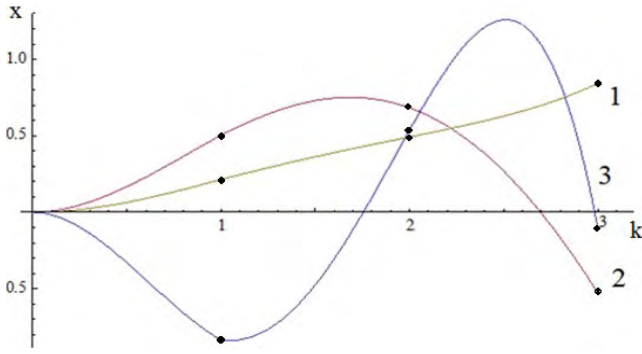


Рис. 4. Формы колебаний, соответствующие: 1 – первой частоте колебаний λ_1 ; 2 – второй частоте λ_2 ; 3 – третьей частоте λ_3 .

Fig. 4. Oscillation forms corresponding to: 1 – the first oscillation frequency λ_1 ; 2 – the second oscillation frequency λ_2 ; 3 – the third oscillation frequency λ_3 .

Наименьшая частота будет λ_1 , наибольшая λ_3 . Им отвечают собственные векторы b_3, b_1 . Интерполяция собственных векторов с учетом условий заделки у фундамента дома приведена на рис. 4. Первой (наименьшей) частоте колебаний λ_1 соответствует кривая 1 при отсутствии полуволн, второй частоте λ_2 – кривая 2 с одной полуволной, третьей частоте λ_3 – кривая 3 с двумя полуволнами. В [13] эти результаты отсутствуют.

Модальная матрица $[Q_F]$, соответствующая матрице податливости $[F]$, может быть получена функцией

$$[Q_F] = \text{JordanDecomposition}[F_1][[1]] = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \varphi_{23} \\ \varphi_{31} & \varphi_{32} & \varphi_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.214935 & -0.504896 & 0.835992 \\ -0.492656 & -0.683054 & -0.539192 \\ -0.843263 & 0.527748 & 0.101928 \end{bmatrix},$$

где вектор-столбец $\{Q^s\}$ называют вектором формы колебаний для s -го тона:

$$\{Q^s\} = \{\varphi_s\} = \begin{Bmatrix} \varphi_{1s} \\ \varphi_{2s} \\ \varphi_{3s} \end{Bmatrix}.$$

Первый индекс показывает номер этажа (нумерация идет снизу). Поэтому только транспонированная матрица $\{b_3, b_2, b_1\}$ совпадает с модальной матрицей $[Q_F]$.

Модальные матрицы, вычисленные по матрице податливости и матрице жесткости, практически совпадают (векторы-столбцы могут отличаться знаком и соответствуют частотам λ_1 и λ).

Подсчитаем перемещения межэтажных перекрытий при учете начальных условий.

Введем размерные величины (в соответствии с [14]). Пусть каждое межэтажное перекрытие весит $P = 400$ т, относительная жесткость верхнего этажа $k_3 = 107$ т·см, $k_2 = 2k_3$, $k_1 = 3k_3$, изгибная жесткость колонн 3-го этажа $D = D_3 = k_3 \frac{h^3}{24} = 2.85333 \cdot 10^8$ т·см², $D_2 = 2D$, $D_1 = 3D$. Высота этажа $h = 4$ м = 400 см. Следовательно, масса этажа будет $m = P/g = 0.4077$ т·с²/см ($g = 981$ см/с²).

Пусть на уровне третьего этажа сообщен ударный импульс, т.е. в начальный момент этажу сообщена скорость $V_{30} = 30$ см/с, а дом находился в покое. Количество движения этажа соответствует импульсу. Допустим, что такая скорость сообщена с помощью треугольного импульса высотой P_0 и длительностью $t_1 = 0.1$ с (как увидим ниже, скорость $V_3(0.1) = 0$). Причем в начальный момент величина нагрузки равна P_0 , затем по линейному закону убывает до нуля. Тогда из равенства разности количества движения этажа импульсу $m(V_{30} - V_3(0.1)) = P_0 t_1 / 2$ найдем начальное значение динамической нагрузки:

$$P_0 = \frac{2mV_{30}}{t_1} = 244.6 \text{ т.}$$

Статический прогиб будет вычисляться по формуле

$$w_{3st} = aP_0 = \frac{P_0}{k} = \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}\right) P_0 = 4.19 \text{ см.}$$

Определяя частоты колебаний по формуле $\omega(i) = \sqrt{\frac{24\lambda(i)D}{mh^3}}$, получим

$$\omega(1) = 10.445 \text{ с}^{-1}; \omega(2) = 24.53 \text{ с}^{-1}; \omega(3) = 40.62 \text{ с}^{-1}.$$

Тогда перемещение i -го этажа запишем через произвольные постоянные A_s , C_s и формы колебаний φ_{is} :

$$w_i(t) = \sum_{s=1}^n \varphi_{is} (A_s \sin(\omega(s)t) + C_s \cos(\omega(s)t));$$

$$w'_i(t) = \sum_{s=1}^n \varphi_{is} \omega(s) (A_s \cos(\omega(s)t) - C_s \sin(\omega(s)t))$$

Выполняя начальные условия $w_i(0) = 0$ см, $w'_i(0) = 30$ см/с, получим

$$C_s = 0, \{A_1 = -2.42192, A_2 = 0.64525, A_3 = 0.0752651\}.$$

Смещения этажей во времени описываются формулами:

$$w_1(t) = 0.520555 \sin(10.4454 t) - 0.325784 \sin(24.5369 t) + 0.062921 \sin(40.6275 t),$$

$$w_2(t) = 1.19317 \sin(10.4454 t) - 0.44074 \sin(24.5369 t) - 0.0405823 \sin(40.6275 t),$$

$$w_3(t) = 2.04231 \sin(10.4454 t) + 0.340529 \sin(24.5369 t) + 0.0076716 \sin(40.6275 t).$$

Смещение этажей здания в течение 1 с показано на рис. 5. Перемещение 3-го этажа – амплитуда самая большая, 2-го – амплитуда меньше, 1-го – самая малая. Колебания негармонические, хотя наблюдается периодичность для 3-го этажа приблизительно в 0.6 с ($T = 2\pi/10.4454 = 0.601$ с). В течение действия $t = 0.1$ с импульса смещение верхнего этажа возрастает до 2 см ($V_3(0.1) = 0$), а затем падает до нуля при $t = 0.3$ с. В дальнейшем по инерции 3-й этаж получает отрицательный прогиб, и по прошествии $t = 0.45$ с смещение достигает абсолютного максимума в 2.4 см. Колебания 2-го и 1-го этажей следуют за колебанием 3-го с некоторым сдвигом фаз. Наибольшая амплитуда по абсолютной величине у 3-го этажа наблюдается при $t = 0.449$ с, она равна динамическому прогибу $|w_{3d}(0.449)| = 2.38663$ см. Поэтому коэффициент динамичности составляет

$$\delta = \frac{|w_{3d}(0.449)|}{w_{3st}} = 0.57,$$

что согласуется с результатами [14] для колебаний с одной степенью свободы при действии треугольного импульса $\delta = 0.66$ при $t_1 / T = 0.2$.

Время относительного действия импульса к периоду основного тона составляет 0.2

$$\text{периода: } \frac{t_1}{T} = \frac{t_1 \omega(1)}{2\pi} = 0.17 \approx 0.2.$$

Интересно отметить, что период колебаний приблизительно в 0.6 с сохраняется (рассеивание энергии отсутствует), тем не менее максимум смещения 3-го этажа в 2.38 см не достигается в течение даже 10 периодов колебаний из-за перекачивания энергии в увеличенные амплитуды 2-го и 1-го этажей.

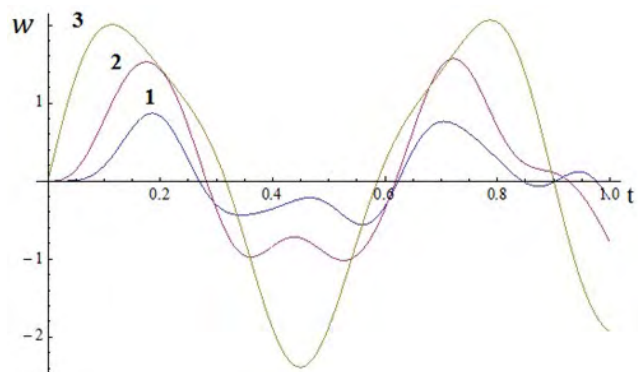


Рис. 5. Смещение первого (1), второго (2), третьего (3) этажей в течение 1 с.

Fig. 5. Displacement of the first (1), second (2), third (3) storey within 1 s.

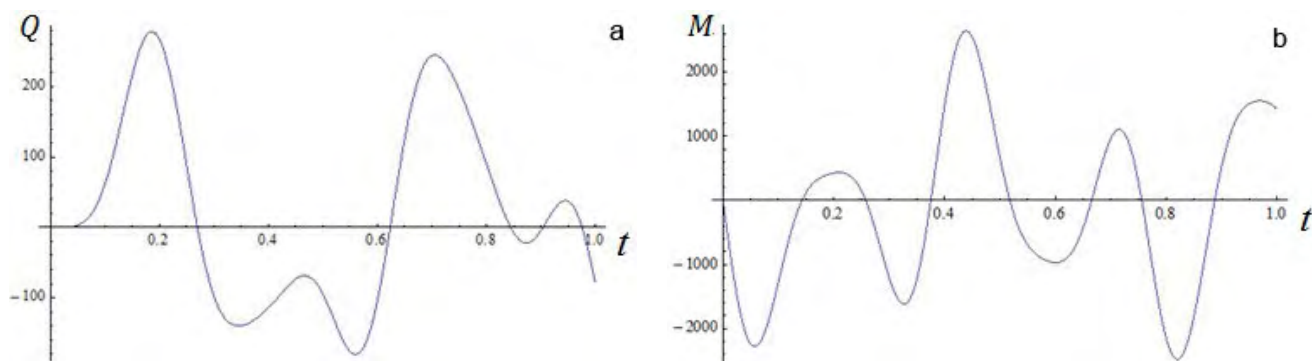


Рис. 6. Суммарная динамическая поперечная сила (а) и суммарный изгибающий момент (б) на фундаменте в течение 1 с.

Fig. 6. The total dynamic transverse force (a) and the total bending moment (b) on the foundation for 1 s.

На рис. 6 а показана суммарная динамическая поперечная сила Q на фундаменте в течение 1 с.

Максимальная поперечная сила Q достигает значения 278 т через 0.2 с. На рис. 6 б показан суммарный изгибающий момент M на фундаменте. Максимум изгибающего момента M_{max} возникает через 0.44 с (в этот момент верхний этаж получает максимальную амплитуду, а поперечная сила Q составляет 80 т) и получает значение 2644 т·м.

Колебания сооружений при импульсной нагрузке состоят из двух фаз: вынужденных колебаний и свободных. В случае действия относительно короткого импульса весь процесс нагружения вынужденных колебаний заканчивается значительно раньше, чем выполняется цикл свободных колебаний. Вынужденные колебания сообщают в конце своего действия начальные перемещения и скорости свободным колебаниям. Поэтому за короткое время действия нагрузки сооружение почти не деформируется. Максимальные амплитуды (деформации) достигаются лишь позже, в процессе свободных колебаний.

На рис. 7 приведена картина разрушений в г. Нагасаки вблизи места взрыва атомной бомбы. Обратите внимание, что дымовые трубы выдержали воздействие ударной волны и не пострадали, тогда как остальные здания разрушились. Этот факт можно объяснить, например, кратковременным импульсом нагрузки и запаздыванием развития деформаций во второй фазе колебаний. Это согласуется с выводами [14, 15] для треугольного импульса: при $t_1 / T < 0.4$ коэффициент динамичности $\delta < 1$.



Рис. 7. Картина разрушений в г. Нагасаки вблизи места взрыва атомной бомбы.

Fig. 7. The picture of destruction in Nagasaki city near the site of an atomic bomb explosion (<https://www.uatom.org/wp-content/uploads/2020/08/5.Torpednij-zavod-Mitsubishi-v-Nagasaki-pislya-vibuhu.jpg>).

Колебание небоскреба в 100 этажей

Допустим, что высотный дом в $n = 100$ этажей обладает следующими параметрами: вес каждого этажа $P = 500$ т, высота этажа $h_i = h = 5$ м = 500 см, относительные жесткости этажей $k_i = k = 321$ т·см, масса перекрытия $m = P/g = 0.509684$ т·с²/см, изгибная жесткость $D_i = D = k \frac{h^3}{24} = 1.67188 \cdot 10^9$ т·см².

Подсчитаем матрицу податливости по формуле (2.2):

$$[F] = a[F_1]; a = \frac{h^3}{24d} = 0.00311526 \text{ см},$$

где $[F_1]$ – безразмерная матрица, имеющая 10 000 элементов. Используя матрицу масс $[M] = m[E]$ и матрицу жесткости $[K] = [F_1^{-1}]/a$, получим исходную матрицу прямого подхода $[M^{-1}][K]$, собственные значения которой являются квадратом круговой частоты колебаний небоскреба. Сокращенный список частот приведен ниже (от 0.4 с^{-1} до 50 с^{-1}).

$\omega(i) = \{0.39224, 1.17662, 1.96072, 2.74434, 3.52728, 4.30937, 5.0904, 5.87019, 6.64854, 7.42527, 8.20019, \langle\langle 78 \rangle\rangle, 49.4517, 49.5799, 49.6959, 49.7999, 49.8916, 49.9712, 50.0385, 50.0937, 50.1365, 50.1672, 50.1856\}$.

Обозначение $\langle\langle 78 \rangle\rangle$ символизирует число промежуточных значений частот, расположенных между приведенными частотами.

Соответствующие им периоды колебаний находятся в интервале от 0.1 до 16 с:

$T_i = 2\pi / \omega(i) = \{16.0187, 5.34002, 3.20453, 2.28951, 1.78131, 1.45803, 1.23432, 1.07036, 0.945047, 0.846189, 0.766224, \langle\langle 78 \rangle\rangle, 0.127057, 0.126729, 0.126433, 0.126169, 0.125937, 0.125736, 0.125567, 0.125429, 0.125321, 0.125245, 0.125199\}$.

Приведем сокращенное число собственных векторов (векторов-строк) трех основных тонов небоскреба (рис. 8):

1-й тон

$\{Q^1\}^T = (Q^1) = (\varphi_{11}, \varphi_{21}, \dots, \varphi_{100,1}) = \{0.00220479, 0.00440905, 0.00661223, 0.00881379, 0.0110132, 0.0132099, 0.0154034, 0.0175931, 0.0197786, 0.0219592, \langle\langle 80 \rangle\rangle, 0.139517, 0.139826, 0.140101, 0.140342, 0.140548, 0.14072, 0.140858, 0.140961, 0.14103, 0.141065\}$;

2-й тон

$\{Q^2\}^T = (Q^2) = \{0.00661223, 0.0132099, 0.0197786, 0.0263038, 0.0327711, 0.0391664, 0.0454757, 0.0516849, 0.0577806, 0.0637492, \langle\langle 80 \rangle\rangle, -0.127303, -0.130012, -0.132435, -0.134568, -0.136404, -0.13794, -0.139174, -0.140101, -0.14072, -0.14103\}$;

3-й тон

$\{Q^3\}^T = (Q^3) = \{-0.0110132, -0.0219592, -0.0327711, -0.043383, -0.0537301, -0.0637492, -0.0733791, -0.0825612, -0.0912393, -0.0993604, \langle\langle 80 \rangle\rangle, -0.103945, -0.111073, -0.117524, -0.123257, -0.128238, -0.132435, -0.135825, -0.138385, -0.140101, -0.140961\}$.

Формы колебаний, соответствующие 1, 2 и 3-й низшим частотам, построены по 100 точкам и показаны на рис. 8. На горизонтальной оси указаны номера этажей, по вертикали – смещение.

Интересно построить высшие формы колебаний 98, 99 и 100-й частоты $\omega(100) = 50.186 \text{ с}^{-1}$, $\omega(99) = 50.167 \text{ с}^{-1}$, $\omega(98) = 50.137 \text{ с}^{-1}$. Они имеют форму колебаний при явлении «биения», происходящем при сложении колебаний с одинаковыми амплитудами и незначительно различающимися частотами. Причем чем меньше разность частот, тем больше длина интервала биения. Эти формы колебаний показаны на рис. 9.

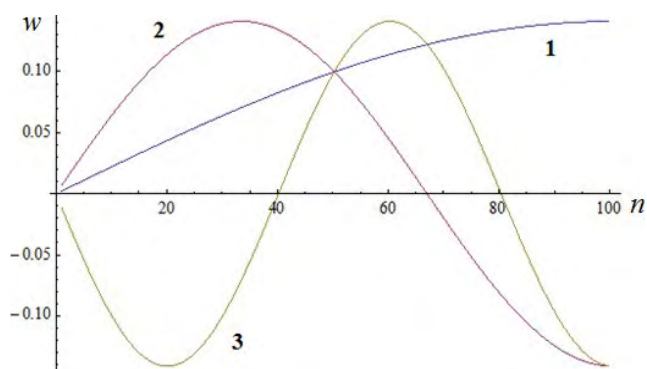


Рис. 8. Формы колебаний, соответствующие 1, 2 и 3-й низшим частотам.

Fig. 8. Oscillation forms corresponding to the 1st, 2nd and 3rd lower frequencies.

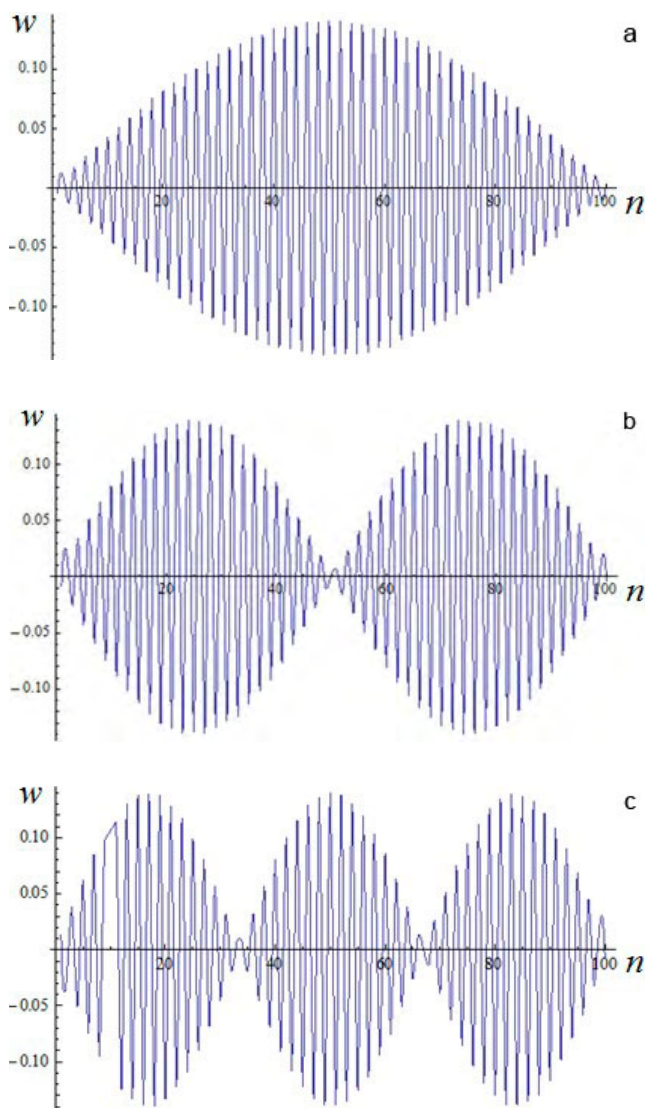


Рис. 9. Формы колебаний для $\omega(100)$ (a), $\omega(99)$ (b), $\omega(98)$ (c).

Fig. 9. Oscillation forms for $\omega(100)$ (a), $\omega(99)$ (b), $\omega(98)$ (c).

Заключение

В связи с тем, что получение точных решений при исследовании собственных и вынужденных колебаний многоэтажных зданий в рамках механики сплошных сред с бесконечным числом степеней свободы часто трудно-реализуемо, в статье сделана попытка наделить модель многоэтажных зданий конечным числом степеней свободы (модернизация метода конечных элементов): масса, размещенная в середине конечных элементов, помещена в некоторое число узлов, которые упруго взаимодействуют с элементами многоэтажных зданий, не имеющими массы. Элементы многоэтажных зданий работают только на изгиб.

С помощью уравнений Лагранжа 2-го рода получена разрешающая система дифференциальных уравнений колебаний многоэтажного здания, в которую в квадратурах записаны выражения для энергий (потенциальной, кинетической и Релея). В статье с использованием функций Грина, матриц жесткости, масс, податливости и др. решены задачи о свободных колебаниях 3- и 100-этажных зданий. Полученные в статье результаты при их сравнении с точными решениями, реализованными с помощью прямого и непрямого методов граничных элементов, а также с другими малоизвестными численными решениями показали хорошее соответствие.

Список литературы

1. Великанов П.Г., Артюхин Ю.П. 2023. Исследования по динамике рамных конструкций. *Геосистемы переходных зон*, 7(2): 180–195. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.180-195>; <https://www.elibrary.ru/llpxlp>
2. Викторова Л.А. 2012. Высотные здания – плюсы и минусы строительства. *Архитектура и строительство России*, 10: 2–11.
3. Халикова А.С., Гамаюнова О.С. 2021. Особенности проектирования высотных зданий в сейсмических районах. *Инженерные исследования*, 5(5): 31–38.
4. Курбацкий Е.Н., Мазур Г.Э., Мондрус В.Л. 2017. Критический анализ состояния нормативной документации по расчету сооружений на землетрясения. *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*, 2(28): 24–30.
5. Магай А.А. 2015. *Архитектурное проектирование высотных зданий и комплексов*. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 328 с.

6. Артюхин Ю.П., Грибов А.П. **2002.** *Решение задач нелинейного деформирования пластин и пологих оболочек методом граничных элементов.* Казань: Фэн, 199 с.
7. Кацикаделис Дж.Т. **2007.** *Граничные элементы: Теория и приложения:* пер. с англ. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 348 с.
8. Великанов П.Г., Артюхин Ю.П., Куканов Н.И. **2020.** Изгиб анизотропной пластины методом граничных элементов. В кн.: *Актуальные проблемы механики сплошных сред.* Казань: Изд-во Акад. наук РТ, с. 105–111.
9. Харрис С.М., Крид Ч.И. **1980.** *Справочник по ударным нагрузкам.* Сокр. перевод с англ. Н.А. Пэдуре. Л.: Судостроение, 358 с.
10. Бабаков И.М. **1958.** *Теория колебаний:* учеб. пособие для высш. техн. учеб. заведений. М.: Гостехиздат, 628 с.
11. Стеклов В.А. **1927.** *Основы теории интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений.* М.; Л.: Госиздат, 419 с.
12. Артюхин Ю.П., Гурьянов Н.Г., Котляр Л.М. **2002.** *Система Математика 4.0 и ее приложения в механике:* учеб. пособие. Казань: Казанское мат. об-во: Изд-во КамПИ, 415 с.
13. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. **1985.** *Колебания в инженерном деле.* М.: Машиностроение, 472 с. http://www.physics.gov.az/book_K/Timoshenko.pdf
14. Клаф Р., Пензиен Дж. **1979.** *Динамика сооружений.* Пер. с англ. Л.Ш. Килимника и А.В. Швецов. М.: Стройиздат, 320 с.
15. Бишоп Р. **1986.** *Колебания.* М.: Наука, 189 с.
- 31–38. (In Russ.). EDN: PRJJEV; URL: <http://eng-res.ru/archive/2021/5/31-38.pdf>
4. Kurbatsky E.N., Mazur G.E., Mondrus V.L. **2017.** [Critical analysis of the state of regulatory documentation for the calculation of structures for earthquakes]. *Natural and Technological Risks. Building Safety*, 2(28): 24–30. (In Russ.). EDN: XYDNSH
5. Magay A.A. **2015.** [Architectural design of high-rise buildings and complexes]. Moscow: Izd-vo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 328 p. (In Russ.).
6. Artyukhin Yu.P., Gribov A.P. **2002.** [Solving problems of nonlinear deformation of plates and shallow shells by the boundary elements method]. Kazan: Fen, 199 p. (In Russ.).
7. Katsikadelis J.T. **2007.** *Boundary elements: Theory and applications.* Moscow: Izd-vo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 348 p. (In Russ.).
8. Velikanov P.G., Artyukhin Yu.P., Kukanov N.I. **2020.** Bending of an anisotropic plate by the method of boundary elements. In: [Actual problems of continuum mechanics]. Kazan: Publ. House of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, p. 105–111. (In Russ.).
9. Harris C.M., Creed Ch.I. **1980.** [Handbook of shock loads]. Leningrad: Sudostroenie, 358 p. (In Russ.). (Transl. from English: C.M. Harris, Ch.E. Crede (eds). **1976.** *Shock and vibration handbook.* Second ed. New York: McGraw-Hill, 1218 p.)
10. Babakov I.M. **1958.** [Theory of oscillations]: Textbook for higher tech. educational institutions. Moscow: Gostekhizdat, 628 p. (In Russ.).
11. Steklov V.A. **1927.** [Fundamentals of the integration theory of the ordinary differential equations]. Moscow; Leningrad: Gosizdat, 419 p. (In Russ.).
12. Artyukhin Y.P., Guryanov N.G., Kotlyar L.M. **2002.** [The Mathematics 4.0 system and its applications in mechanics]: Textbook. Kazan: Kazan Mathematical Society: Publ. House of CamPI, 415 p. (In Russ.).
13. Timoshenko S.P., Yang D.H., Weaver U. **1985.** *Vibration problems in engineering.* Moscow: Mashinostroyeniye, 472 p. (In Russ.). http://www.physics.gov.az/book_K/Timoshenko.pdf
14. Clough R.W., Penzien J. **1975.** *Dynamics of structures.* Moscow: Stroyizdat, 320 p.
15. Bishop R.E.D. **1965.** *Vibration.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 156 p.

References

1. Velikanov P.G., Artyukhin Yu.P. **2023.** Research on the dynamics of frame structures. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 7(2): 180–195. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.180-195>; <https://www.elibrary.ru/lpplp>
2. Viktorova L.A. **2012.** Tall buildings – the pros and cons of building. *Architecture and construction of Russia*, 10: 2–11. (In Russ.). EDN: PEJJDT
3. Khalikova A.S., Gamayunova O.S. **2021.** Features of designing high-rise buildings in seismic areas. *Inzhenernyye issledovaniya = Engineering Research*, 5(5):

Об авторах

Великанов Петр Геннадьевич (<https://orcid.org/0000-0003-0845-2880>), кандидат физико-математических наук, доцент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ; Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, pvelikanov@mail.ru
Артюхин Юрий Павлович (<https://orcid.org/0000-0002-6243-9145>), доктор физико-математических наук, профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, ArtukhinYP@mail.ru

Поступила 7.04.2023

Принята к публикации 26.05.2023

About the Authors

Velikanov, Peter G. (<https://orcid.org/0000-0003-0845-2880>), Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan; Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, pvelikanov@mail.ru

Artyukhin, Yury P. (<https://orcid.org/0000-0002-6243-9145>), Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, ArtukhinYP@mail.ru

Received 7 April 2023

Accepted 26 May 2023

© Автор 2023 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Author 2023. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

НАУЧНАЯ СМЕНА

Маслова

Марина Николаевна

В 2022 г. окончила Департамент наук о Земле Дальневосточного федерального университета по магистерской специальности «Природопользование и охрана природы». За время обучения в университете дважды проходила производственную практику в Информационно-картографическом центре Тихоокеанского института географии ДВО РАН. Студенткой 3-го курса бакалавриата пришла туда на работу в качестве младшего научного сотрудника. Бакалавриатская и магистерская дипломные работы были посвящены изучению структуры использования земель в трансграничном бассейне реки Раздольная (КНР и РФ).

В настоящее время является аспирантом ТИГ ДВО РАН по направлению «Геоэкология». Научные интересы связаны с изучением природопользования с помощью данных дистанционного зондирования и геоинформационных систем. Диссертационное исследование посвящено изучению структуры использования земель и

геологического состояния трансграничного бассейна реки Туманная в пределах КНР, КНДР и РФ.

Регулярно принимает участие в форумах и конференциях регионального, российского и международного уровня. С 2022 г. начала публиковать научные работы.

УДК 910.3

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.316-330>
<https://www.elibrary.ru/kfayqb>

Количественный анализ эколого-хозяйственного баланса и структуры использования земель бассейна р. Туманная

М. Н. Маслова

@ E-mail: maslova.marina.99@mail.ru

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

Резюме. Работа посвящена изучению структуры использования земель в трансграничном бассейне р. Туманная. На основе данных дистанционного зондирования составлена карта использования земель бассейна р. Туманная. Согласно бассейновому подходу, территория с помощью программного комплекса ArcGIS была разделена на бассейны притоков I, II и III порядка – всего 21. Анализ результатов картографирования был проведен с применением математических методов и количественных приемов. Выявлено, что эколого-хозяйственное состояние трансграничного бассейна имеет низкий уровень напряженности. Менее сбалансировано

эколого-хозяйственное состояние пойменной части, для которой установлены низкие значения коэффициента естественной защищенности. Минимальное значение данного коэффициента характерно для территории КНДР. Среди количественных показателей более информативны энтропийная мера сложности и ее производные, а также индекс Маргалефа. Высокими значениями большинства показателей сложности обладают припойменные части бассейна в пределах КНР и КНДР. В отличие от периферийных частей бассейна, они подвержены большему антропогенному воздействию. Российская территория бассейна является наименьшей по площади, с меньшим разнообразием типов использования земель и большей их раздробленностью.

Ключевые слова: трансграничный бассейн, тип использования земель, эколого-хозяйственный баланс, количественные приемы анализа карт

Quantitative analysis of the ecological and economic balance and the structure of land use in the basin of the Tumannaya River

Marina N. Maslova

@ E-mail: maslova.marina.99@mail.ru

Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. The article is devoted to the study of the structure of land use in the transboundary basin of the Tumannaya River. The map of land use within the Tumannaya River basin was compiled using remote sensing data. According to the basin approach, the territory was divided into the tributary basins of the first, second and third order using the Arc-GIS software suite – a total of 21. The mapping results were analyzed by means of mathematical methods and quantitative techniques. The ecological and economic state of the transboundary basin has been found to have a low level of tension. The ecological and economic state of the floodplain is less balanced, for which low values of the natural protection coefficient have been identified. The minimum value of this coefficient is typical for the DPRK territory. The entropic measure of complexity and its derivatives as well as the Margalef index are more informative among the quantitative indicators. The floodplain parts of the basin within the PRC and the DPRK also have high values for most of the complexity indicators. Unlike the peripheral parts of the basin, they are more susceptible to anthropogenic effect. The Russian territory of the basin is the smallest in terms of the area, with less diversity in types of land use and greater fragmentation.

Keywords: transboundary basin, land use, ecological and economic balance, quantitative methods of map analysis

Для цитирования: Маслова М.Н. Количественный анализ эколого-хозяйственного баланса и структуры использования земель бассейна р. Туманная. *Геосистемы переходных зон*, 2023, т. 7, № 3, с. 316–330. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.316-330>; <https://www.elibrary.ru/kfayqb>

For citation: Maslova M.N. Quantitative analysis of the ecological and economic balance and the structure of land use in the basin of the Tumannaya River. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 316–330. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.316-330>; <https://www.elibrary.ru/kfayqb>

Введение

Водосборный бассейн р. Туманная занимает уникальное географическое положение и является одной из ключевых трансграничных территорий Дальнего Востока России. Свое начало река берет с восточного склона потухшего вулкана Пэктусан на плоскогорье Чанбайшань. Общая площадь водосбора составляет немногим более 33 тыс. км². Длина реки – 549 км [1]. На большем своем протяжении река формирует границу КНДР с Китаем, на последних 17 км до впадения в Японское море является пограничной между КНДР и РФ. Таким образом, большая часть бассейна

реки находится в пределах КНР, 31 % в пределах КНДР и менее 1 % – в пределах РФ.

Водосборные бассейны крупных рек являются целостными геосистемами высшего уровня [2]. Единая геосистема или сочетание геосистем регионального уровня служат для территории основанием статуса международной трансграничной [3]. К такому типу территорий относится и бассейн р. Туманная, так как он расположен на взаимодействующих приграничных территориях, обладающих сочетаниями природных ресурсов и различных видов хозяйственной деятельности.

Бассейн расположен в месте пересечения интересов не только пограничных государств,

но и других стран Северо-Восточной Азии и Азиатско-Тихоокеанского региона. Так, ряд отдельных соглашений о сотрудничестве и приостановленный проект «Туманган» осуществлялись в области экономики (энергетика и торговля), транспорта, туризма и культуры, охраны окружающей среды [4]. В связи с отсутствием единой региональной политики существует необходимость изучения территории начиная с ее экологического состояния. Применение бассейнового принципа Л.М. Коротного позволяет рассматривать речной бассейн как целостную геосистему с четкими границами [2], как целостный объект комплексных географических оценок, анализа структуры и динамики, разработки общих принципов, норм и ограничений природопользования по обе стороны от государственной границы [5].

Целью настоящей работы является количественный анализ эколого-хозяйственного баланса (ЭХБ) и структуры использования земель бассейна р. Туманная. Эколого-хозяйственный баланс территории есть сбалансированное соотношение различных видов деятельности и интересов различных групп населения с учетом потенциальных и реальных возможностей природы. Необходимым для понимания современного состояния территории является установление различий ЭХБ составляющих частей трансграничного бассейна. Расширенный анализ землепользования на отдельных частях трансграничного речного бассейна важен для определения вектора развития социально-экономических, экологических, политических и иных отношений между пограничными странами, а также для разработки совместных действий по контролю и уменьшению негативного антропогенного влияния [5].

Материалы и методы исследования

Изучение и анализ структуры использования земель бассейна р. Туманная проведены автором с использованием данных дис-

танционного зондирования. Единообразные картографические данные позволяют корректно сравнивать три части трансграничного бассейна. Космические снимки за май, июнь и сентябрь 2019 и 2020 гг. аппаратов Sentinel-2 и Landsat-8 взяты с сервера EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>; accessed 28.08.2022). Дешифрирование космических снимков осуществлялось с помощью создания векторных слоев с выделением полигональных и линейных объектов в программном пакете ArcGIS Pro.

Анализ землепользования проведен нами согласно классификации типов использования земель, разработанной на основе Земельного кодекса РФ* и геоэкологической классификации ландшафтов В.А. Николаева [6]. Типы использования земель были условно разделены на две группы – природные и антропогенные. К первой группе относятся лесные земли, луга, редколесья и кустарники, водные объекты; ко второй – используемые и неиспользуемые сельскохозяйственные земли, рисовые поля, рубки и лесопосадки, карьеры, земли населенных пунктов и земли промышленного использования. Всего 12 категорий земель. В результате построена карта использования земель в бассейне р. Туманная по состоянию на 2020 г. в масштабе 1:100 000 [7].

Согласно бассейновой концепции Л.М. Коротного [2], специфика природопользования бассейновой геосистемы определяется как трансграничностью геосистемы с дифференцированными экономиками соседних государств и их воздействием на части геосистемы, так и ее бассейновым характером. Многофакторное воздействие хозяйственной политики пограничных стран определяет необходимость изучения состояния отдельных частей международной трансграничной территории, а также комплекса проблем, влияющих на эффективность природопользования и экологическое состояние данной территории. Таким образом, основным научным подходом в исследовании был принят бассейновый.

* Земельный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 25.10.2001 № 136-ФЗ (ред. от 24.06.2023). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/ (дата обращения 01.08.2023). [The Land Code of the Russian Federation: Federal Law No. 136-FZ of October 25, 2001 (as amended on 24.06.2023)].

Таблица 1. Основные показатели количественной оценки структуры использования земель бассейна р. Туманная [8–12]
Table 1. Main indicators of quantitative assessment of the structure of land use in the Tumannaya River basin [8–12]

№ п/п	Показатель	Обозначение / формула
<i>Группа простейших характеристик</i>		
1	Площадь района (зоны)	S
2	Площадь одного природно-территориального комплекса в районе (зоне)	S_i
3	Количество природно-территориальных комплексов	M
4	Количество контуров	n
5	Среднее количество контуров на 1 природно-территориальный комплекс	p
6	Средняя площадь ландшафтных контуров	$S_0 = \frac{S}{n}$
<i>Группа характеристик сложности</i>		
7	Индекс дробности ландшафтных контуров	$k = \frac{n}{S}$
8	Коэффициент сложности структуры ландшафтов	$K_{\text{слож}} = \frac{n}{S_0}$
9	Коэффициент ландшафтной раздробленности	$K = \frac{S_0 \cdot 100 \%}{P}$
10	Энтропийная мера сложности ландшафтного рисунка (мера общего разнообразия)	$H = - \sum_{i=1}^m \frac{S_i}{S} \log_2 \frac{S_i}{S}$
11	Максимально возможная энтропийная сложность ландшафтного строения	$H_{\text{max}} = \log_2 M$
12	Относительная организация ландшафтов (мера упорядоченности)	$R = 1 - \frac{H}{H_{\text{max}}}$
13	Абсолютная организация ландшафтов (мера неуравновешенности)	$H_1 = H_{\text{max}} - H$
14	Выравненность рангового распределения (мера однообразия)	$E = \frac{H}{H_{\text{max}}}$
15	Индекс Маргалефа	$D_{mg} = \frac{(M - 1)}{\ln S}$
<i>Показатели эколого-хозяйственного баланса</i>		
16	Коэффициент абсолютной напряженности	$K_a = \frac{AH_6}{AH_1}$
17	Коэффициент относительной напряженности	$K_o = \frac{AH_4 + AH_5 + AH_6}{AH_1 + AH_2 + AH_3}$
18	Суммарная площадь земель со средо- и ресурсостабилизирующими функциями (сф)	$P_{\text{сф}} = P_1 + 0.8P_2 + 0.6P_3 + 0.4P_4$
19	Коэффициент естественной защищенности	$K_{\text{ез}} = \frac{P_{\text{сф}}}{P_0}$

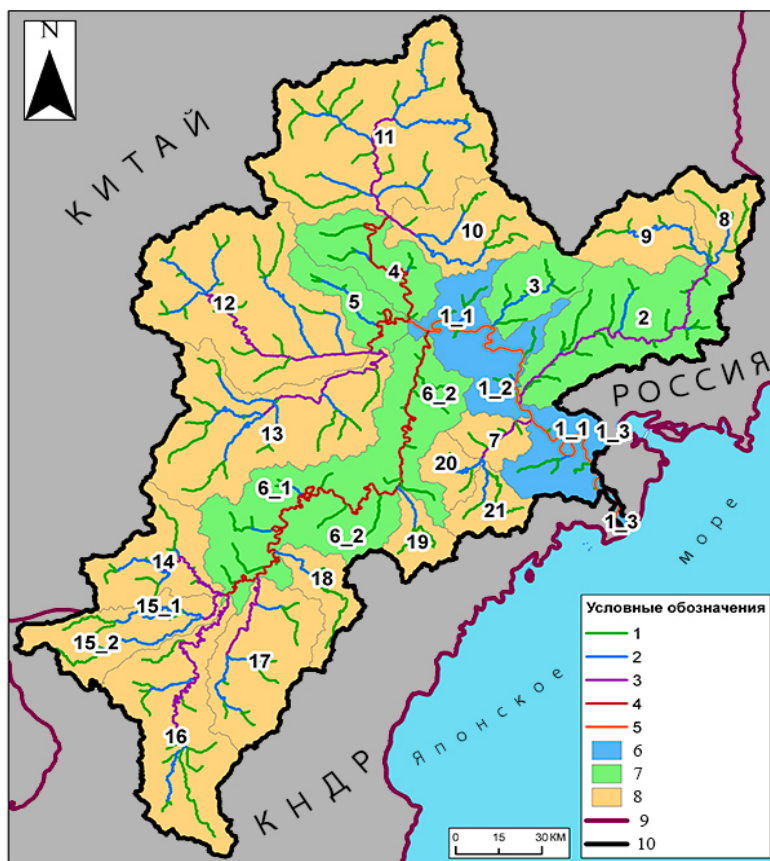


Рис. 1. Структура бассейна р. Туманная. Порядок водотоков: 1 – приток I порядка, 2 – приток II порядка, 3 – приток III порядка, 4 – приток IV порядка, 5 – приток V порядка. Порядок бассейнов: 6 – I порядка, 7 – II порядка, 8 – III порядка. 9 – государственная граница (в пределах бассейна р. Туманная граница проходит по руслам рек); 10 – граница бассейна р. Туманная. Цифрами от 1 до 21 обозначены выделенные бассейны.

Fig. 1. Structure of the Tumannaya River basin. The order of watercourses: 1 – tributary of the 1st order, 2 – tributary of the 2nd order, 3 – tributary of the 3rd order, 4 – tributary of the 4th order, 5 – tributary of the 5th order. Basin order: 6 – 1st order, 7 – 2nd order, 8 – 3rd order. 9 – state border (within the Tumannaya River basin, the border runs along riverbeds); 10 – boundary of the Tumannaya River basin. Numbers from 1 to 21 indicate selected basins.

На основе цифровой модели рельефа с использованием приложения Model Builder, инструментов пространственного анализа и инструмента «гидрология» в программе ArcGIS Pro была построена цифровая модель системы водотоков и бассейнов р. Туманная. Для дальнейшего картографо-статистического анализа общий бассейн реки был разделен на бассейны притоков I, II и III порядков – всего 21. Бассейны, которые находятся на пересечении государственных границ, а именно бассейны № 1, № 6 и № 15, были разделены по линии государственной границы. Так образованы бассейны № 1_1, 1_2 и 1_3, 6_1 и 6_2, 15_1 и 15_2. Таким образом, всего для

анализа было сгенерировано 25 бассейнов (рис. 1).

В рамках исследования был проведен расчет и анализ эколого-хозяйственного баланса территории. Для его определения в пределах бассейна р. Туманная использованы следующие характеристики: распределение земель по видам и категориям, площади земель по видам и степени антропогенной нагрузки, напряженность эколого-хозяйственного состояния (ЭХС) территории, интегральная антропогенная нагрузка, естественная защищенность территории, экологический фонд территории [8]. В расчетах не использовались значения площади природоохранных территорий, так как получить корректные и сравнимые данные по КНР и КНДР не представляется возможным.

Для количественной оценки сложности и разнообразия структуры использования земель математическими методами были выбраны следующие показатели: индекс дробности, коэффициент ландшафтной раздробленности, коэффициент сложности структуры ландшафтов, энтропийная мера сложности ландшафтного рисунка, максимально возможная сложность ландшафтного строения,

относительная и абсолютная организация ландшафтов, выравниваемость рангового распределения, индекс Маргалефа [8–12] (табл. 1).

Результаты и обсуждение

Эколого-хозяйственный баланс территории означает сбалансированное соотношение различных видов деятельности и интересов населения на территории с учетом потенциальных и реальных возможностей природы. Баланс обеспечивает устойчивое развитие природы и общества, воспроизводство природных ресурсов и отсутствие отрицательных экологических изменений и последствий. Учет ЭХБ территории позволяет совершенствовать структуру

землепользования и создавать на его основе структуры соответствия элементов ландшафта и видов использования земель с ориентацией на постоянное расширение природных систем жизнеобеспечения человека.

Для определения степени антропогенной нагрузки (АН) земель вводятся экспертные балльные оценки. Согласно методике Б.И. Кочурова, выделенные в результате картографирования типы использования земель были объединены в однородные группы от минимальной до максимальной степени АН и каждому типу был присвоен соответствующий балл (табл. 2). К землям с очень низкой степенью АН (1 балл) не был отнесен ни один тип земель (отметим, что получить корректную информацию о количестве и распределении ООПТ для КНР и КНДР не удалось).

Группировка земель по степени АН позволяет оценить антропогенную преобразованность территории в сопоставимых показателях. Таким образом, были посчитаны коэффициенты абсолютной (K_a) и относительной (K_o) напряженности ЭХС территории (табл. 3).

Коэффициент абсолютной напряженности показывает отношение площади земель, сильно нарушенных антропогенной деятельностью, к площади малотронутых/нетронутых территорий. Преобладание последних определяет более низкое значение коэффициента, а значит свидетельствует о большем благополучии состояния окружающей среды. В пре-

делах трансграничного бассейна р. Туманная значение данного коэффициента находится в диапазоне от 0.005 (бассейн № 21) до 0.129 (бассейн № 12). Среднее значение K_a для всего бассейна составляет 0.05. Для всех выделенных бассейнов отмечается значительный перевес площади земель с низкой АН по сравнению с землями с высокой АН. Это определяется доминированием в структуре земель лесных земель и земель, занятых лугами. Особенно большой перевес отмечается для корейской части бассейна со средним значением $K_a = 0.035$ (для китайской части среднее значение равно 0.057, российской – 0.099).

Коэффициент относительной напряженности (K_o) в наибольшей степени характеризует ЭХС, так как при его расчете охватывается вся территория и все типы земель. Сбалансированную напряженность ЭХС по степени АН и потенциалу устойчивости природы характеризует значение данного коэффициента близкое или равное 1. Среднее значение для бассейна р. Туманная составляет 0.234. Наиболее сбалансированную напряженность ЭХС имеет бассейн под номером 1_2, являющийся частью бассейна I порядка и расположенный в припойменной части бассейна р. Туманная на территории КНДР. Ему присуще максимальное значение коэффициента среди всех рассматриваемых бассейнов – 0.858.

Среднее значение для корейской части бассейна K_o составляет 0.364. В целом для бассейнов в пределах КНДР показатели коэффи-

Таблица 2. Классификация земель бассейна р. Туманная по степени антропогенной нагрузки

Table 2. Classification of lands of the Tumannaya River basin according to the degree of anthropogenic load

Степень АН	Балл	Виды и категории земель по классификации Б.И. Кочурова [8]	Тип использования земель согласно классификации при картографировании бассейна р. Туманная	Площадь в пределах бассейна, км ²
Высшая	6	Земли промышленности, транспорта городов, поселков, инфраструктуры; нарушенные земли	Карьеры, населенные пункты, промышленные объекты	1 456.26
Очень высокая	5	Орошаемые и осушаемые земли	Рисовые чеки	409.57
Высокая	4	Пахотные земли; ареалы интенсивных рубок; пастбища и сенокосы, используемые нерационально	Сельскохозяйственные земли (используемые и неиспользуемые), рубки	4 424.77
Средняя	3	Многолетние насаждения, рекреационные земли	Лесопосадки, редколесья, водные объекты	487.83
Низкая	2	Сенокосы; леса, используемые ограничено	Лесные земли, луга	26 344.53
Очень низкая	1	Природоохранные и неиспользуемые земли	—	—

циента приближены к усредненному значению 0.5 – это бассейны № 6_2 (0.511), № 7 (0.461), № 20 (0.453) и № 16 (0.410). Бассейны № 6_2, 7 и 20 находятся в средней части бассейна реки со среднегорным и равнинным рельефом и характеризуются средней освоенностью. Бассейн № 16 находится в южной высокогорной части. Наименьшее значение K_o (0.020) присуще бассейну № 14 на территории КНР. Среднее значение коэффициента относительной напряженности для китайской части бассейна составляет 0.154, что свидетельствует о наименее сбалансированной напряженности ЭХС этой территории. Для бассейна № 1_3, который находится в пределах России, также характерно одно из низких значений коэффициента – 0.060.

Устойчивость природно-антропогенной территории напрямую зависит от ее разнообразия: более высокое разнообразие определяет большую устойчивость. Уровень естественной защищенности территории зависит от площади и распределения земель экологического фонда. Чем больше площадь естественных биоценозов, урочищ, природоохранных зон и ООПТ, т.е. земель *со средо- и ресурсостабилизирующими функциями*, тем выше естественная защищенность и устойчивость территории. Уровень естественной защищенности также зависит от распределения земель по степени АН.

Коэффициент естественной защищенности (K_{ez}) отражает отношение земель со

Таблица 3. Показатели эколого-хозяйственного баланса бассейна р. Туманная
Table 3. Indicators of ecological and economic balance of the Tumannaya River basin

Номер бассейна	Коэффициент абсолютной напряженности (K_a)	Коэффициент относительной напряженности (K_o)	Земли со средо- и ресурсостабилизирующими функциями ($P_{сф}$)	Коэффициент естественной защищенности (K_{ez})
1_1	0.121	0.307	847.040	0.839
1_2	0.099	0.858	1029.569	0.772
1_3	0.021	0.060	28.963	0.945
2	0.093	0.255	2042.573	0.865
3	0.013	0.031	753.082	0.980
4	0.060	0.216	954.232	0.889
5	0.098	0.199	575.221	0.879
6_1	0.049	0.121	1815.340	0.928
6_2	0.049	0.511	1474.869	0.842
7	0.044	0.461	354.383	0.847
8	0.011	0.074	667.699	0.965
9	0.013	0.035	915.653	0.978
10	0.050	0.097	1170.077	0.935
11	0.025	0.125	3873.806	0.939
12	0.129	0.289	2957.727	0.845
13	0.117	0.349	2447.080	0.836
14	0.008	0.020	1183.931	0.987
15_1	0.014	0.037	242.416	0.977
15_2	0.038	0.191	855.506	0.910
16	0.011	0.410	2071.502	0.877
17	0.011	0.204	1539.051	0.926
18	0.041	0.270	538.941	0.894
19	0.018	0.177	428.058	0.928
20	0.037	0.453	311.226	0.858
21	0.005	0.103	475.538	0.956
Среднее	0.05	0.23	1182.14	0.90

средо- и ресурсостабилизирующими функциями к общей площади территории. Данный интегральный коэффициент используется для комплексной оценки территории, а его значение менее 0.5 свидетельствует о критическом уровне защищенности территории. Среднее значение $K_{\text{ез}}$ для всего трансграничного бассейна р. Туманная составляет 0.9. Среди 25 выделенных бассейнов наименьшее значение $K_{\text{ез}}$ у бассейна № 1_2 (0.77) на территории КНДР. Совместно с бассейнами № 1_1, № 6_2 и № 13 он образует территорию, преимущественно

в центральной части бассейна р. Туманная, с наименьшим соотношением земель со стабилизирующими функциями. Однако значения $K_{\text{ез}}$ в пределах этой территории значительно выше 0.5, что свидетельствует об отсутствии критического уровня естественной защищенности.

Наибольшее значение коэффициента – у бассейна № 14 (0.987) в пределах КНР (рис. 2). В целом, среднее значение коэффициента защищенности для китайской части составляет 0.917, для корейской – 0.881. Для бассейна № 1_3, единственного в пределах российской

части бассейна, значение коэффициента составляет 0.945 (табл. 3).

Для характеристики сложности и разнообразия структуры использования земель был выбран ряд показателей (таблицы 1 и 4). Их анализ позволяет выявить специфику структуры землепользования исследуемой территории и определить пути ее развития.

Индекс дробности k характеризует раздробленность и пестроту состава ландшафтного рисунка. Данный индекс показывает среднее количество контуров на выделенную территорию исследования [9]. Среднее значение индекса составляет 0.25. Максимальное значение (0.98) характерно для бассейна под номером 1_3 в пределах российской части. Близость государственной границы и вытянутость этого бассейна, а также небольшая его площадь определяют полученное значение индекса. Минимальные значения (0.06–0.07) присущи бассейнам № 3 и 14 на территории КНР, а также бассейну № 15_2 на территории КНДР. При их довольно средней для всего бассейна р. Туманная площади, им свойственны максимальные значения средней площади контура – 14.2 км², 14.6 км² и 17.7 км² соответственно (при среднем для 25 составляющих бассейнов значении площади контура 6.4 км²) (табл. 4).

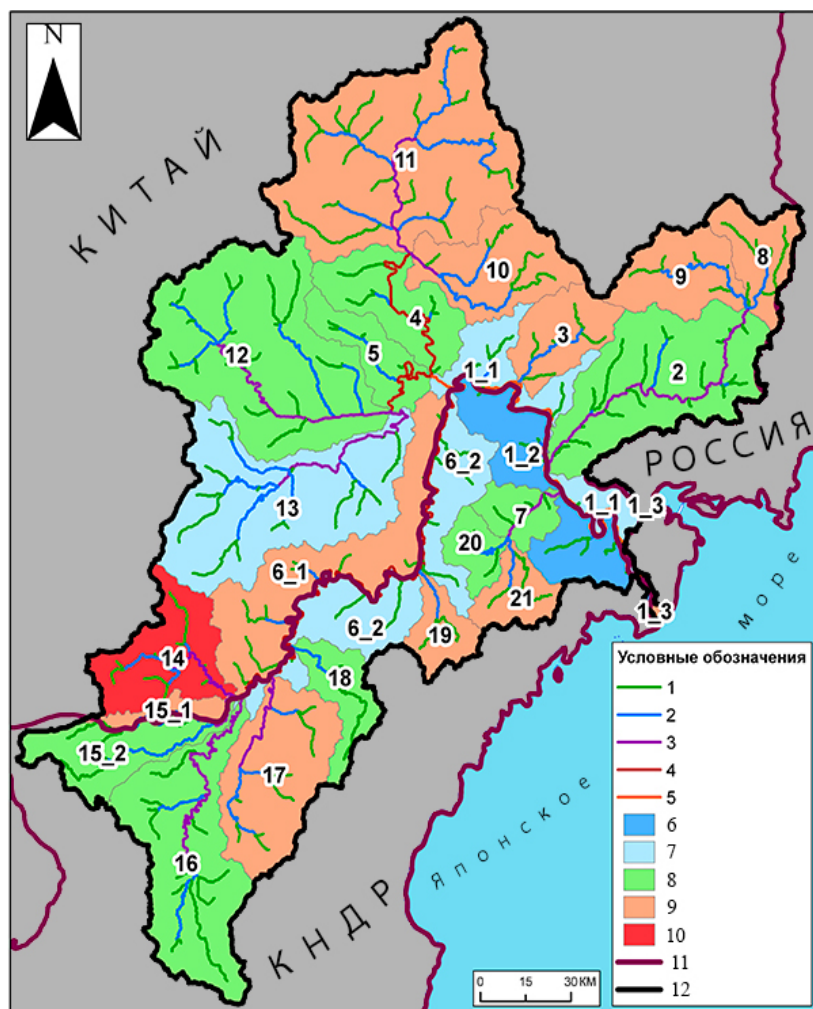


Рис. 2. Ранжирование территории бассейна р. Туманная по значению коэффициента естественной защищенности. Порядок водотоков (притоков): 1 – 1 порядка, 2 – II порядка, 3 – III порядка, 4 – IV порядка, 5 – V порядка. Значение коэффициента естественной защищенности: 6 – минимальное, 7 – низкое, 8 – среднее, 9 – высокое, 10 – максимальное. 11 – граница бассейна р. Туманная; 12 – государственная граница. Цифрами от 1 до 21 обозначены выделенные бассейны.

Fig. 2. Ranking of the territory of the Tumannaya River basin according to the value of the natural protection coefficient. The order of watercourses (tributaries): 1 – tributary of the 1st order, 2 – 2nd order, 3 – 3rd order, 4 – 4th order, 5 – 5th order. Value of natural protection coefficient: 6 – minimum, 7 – low, 8 – average, 9 – high, 10 – maximum. 11 – boundary of the Tumannaya River basin; 12 – state border. Numbers from 1 to 21 indicate selected basins.

Таблица 4. Результаты количественного анализа структуры использования земель бассейна р. Туманная
Table 4. Results of a quantitative analysis of the structure of land use in the Tumannaya River basin

Номер бассейна	Индекс дробности (k)	Коэффициент сложности ($K_{\text{слож}}$)	Коэффициент ландшафтной раздробленно- сти (K)	Энтропийная мера сложности ландшафтного рисунка (H)	Максимально воз- можная сложность ландшафтов (H_{max})	Относительная организация ландшафта (R)	Абсолютная организация ландшафта (H_1)	Выравненность рангового рас- пределения (E)	Индекс Маргалефа (D_{mg})
1_1	0.42	177.17	0.24	1.32	3.46	0.62	2.14	0.38	61.00
1_2	0.32	137.36	0.23	1.43	3.00	0.52	1.57	0.48	59.34
1_3	0.98	29.36	3.33	0.66	3.00	0.78	2.34	0.22	8.47
2	0.29	196.40	0.15	1.03	3.46	0.70	2.43	0.30	87.55
3	0.07	3.79	1.85	0.13	3.46	0.96	3.33	0.04	7.98
4	0.35	131.02	0.27	0.88	3.46	0.75	2.58	0.25	53.59
5	0.38	94.79	0.40	1.02	3.58	0.72	2.57	0.28	38.25
6_1	0.26	132.43	0.20	0.36	3.46	0.90	3.10	0.10	67.03
6_2	0.37	237.57	0.16	1.46	3.32	0.56	1.86	0.44	86.23
7	0.24	24.37	0.99	0.99	3.00	0.67	2.01	0.33	16.56
8	0.21	29.98	0.69	0.27	3.17	0.92	2.90	0.08	21.87
9	0.15	22.15	0.69	0.16	3.32	0.95	3.16	0.05	20.90
10	0.12	19.44	0.64	0.39	3.46	0.89	3.07	0.11	21.73
11	0.21	177.20	0.12	0.54	3.46	0.84	2.92	0.16	102.58
12	0.36	461.43	0.08	1.23	3.58	0.66	2.35	0.34	155.62
13	0.39	441.75	0.09	1.26	3.58	0.65	2.32	0.35	142.33
14	0.07	5.61	1.22	0.10	3.00	0.97	2.90	0.03	11.42
15_1	0.11	2.94	3.70	0.25	2.32	0.89	2.07	0.11	4.72
15_2	0.06	2.99	1.89	0.66	2.58	0.74	1.92	0.26	7.60
16	0.11	30.42	0.37	0.75	2.58	0.71	1.83	0.29	34.38
17	0.10	16.99	0.60	0.61	3.00	0.80	2.39	0.20	22.52
18	0.10	6.38	1.61	0.50	2.81	0.82	2.31	0.18	9.53
19	0.12	6.32	1.85	0.41	2.58	0.84	2.18	0.16	8.64
20	0.28	29.25	0.97	0.84	2.81	0.70	1.96	0.30	17.31
21	0.12	7.00	1.69	0.31	2.81	0.89	2.50	0.11	9.34
Среднее	0.25	96.96	0.96	0.70	3.13	0.78	2.43	0.22	43.06

Коэффициент сложности структуры ландшафтов $K_{\text{слож}}$ прямо пропорционален числу морфологических единиц и обратно пропорционален их среднему размеру [13]. Среднее значение коэффициента сложности ландшафтного рисунка природных районов для трансграничного бассейна составляет 96.96 (табл. 4). Наибольшие значения отмечаются для бассейнов № 12 и 13 (461.43 и 441.75 соответственно) на территории КНР, а также для бассейна № 6_2 (237.57) на территории КНДР. Таким образом, подтверждается прямая зависимость сложности от количества морфологических единиц, так как названы бассейны с наибольшими площадями и наибольшим количеством полигонов. Высокие значения (от 130 и более) характерны для крупных бассейнов в центральной части бассейна, здесь находятся одни из основных притоков р. Туманная. Это наиболее освоенная территория с наибольшим количеством полигонов и максимальным разнообразием типов использования земель.

Средняя площадь контура и низкий коэффициент сложности говорят о менее сложной структуре использования земель в пределах бассейнов № 3, 14, 15_1, 15_2, 18, 19 и 21, где значения коэффициента менее 7.0. Наименьшие значения $K_{\text{слож}}$ характерны для бассейнов № 15_1 и 15_2 (2.94 и 2.99 соответственно). Указанные бассейны являются частями одного водосборного бассейна III порядка, пересекаемого государственной границей. В данном случае выделенные полигоны определенного типа использования земель были разделены согласно границе, образуя более дробный рисунок. Но в определенной степени вычисленный коэффициент имеет низкие значения из-за небольшой площади бассейнов. Значения $K_{\text{слож}}$ от минимального до 94.8 характерны преимущественно для бассейнов притоков III порядка, с площадью до 1250 км², на периферии трансграничного бассейна р. Туманная. В пределах этих бассейнов, как правило, отмечаются крупные полигоны таких земель, которые не используются в активной хозяйственной деятельности.

Для определения *энтропийной меры сложности ландшафтного рисунка* H (иначе – общего разнообразия) используется формула Шеннона–Винера [9]. Расчет данного показателя

позволяет выявить неопределенность типологической принадлежности полигона. Неопределенность тем выше, чем менее однороден участок. При среднем значении показателя энтропийной меры сложности для всего бассейна р. Туманная 0.70 (табл. 4), максимальное значение для бассейна № 6_2 на территории КНДР составляет 1.465. Значение выше 1.0 характерно также для бассейнов № 1_1, 1_2, 2, 5, 12, 13. Это бассейны внутренней части бассейна р. Туманная, расположенные в непосредственной близости от основного русла реки и ее притоков, в низменной и среднегорной местности. Для каждого из указанных бассейнов характерно большое количество полигонов разного типа и высокая средняя площадь полигонов. Минимальное значение отмечается у бассейна № 14 (0.099). Он преимущественно покрыт лесами, расположен в высокогорной юго-западной части всего бассейна, на склонах влк. Пэктусан в пределах КНР.

Для количественного анализа структуры использования земель также применяются производные энтропийные структурные показатели, которые направлены на оценку организованности ландшафтного строения территории. *Максимально возможная энтропийная мера сложности ландшафтного строения* (H_{max}) зависит от количества геосистем определенного участка [14]. Данный показатель позволяет измерять сложность системы ее разнообразием (числом состояний), в которых она может находиться. Мера однообразия определяется отношением абсолютной энтропии к максимально возможной при данном количестве типов использования земель (табл. 1). То есть отношение величины энтропийной меры сложности к максимально возможной дает оценку *выравненности рангового распределения* E [15] (иначе – меры однообразия [9]). Эффективность хозяйственной деятельности тем выше, чем меньше выравнивание. Большее значение выравнивания свидетельствует о большей эффективности стратегии сохранения разнообразия. От величины выравнивания напрямую зависит способность системы производить полезную работу – чем меньше первое, тем легче получить полезную продукцию.

Неопределенность системы характеризует ее неорганизованность. Чем меньше допу-

стимых состояний может иметь система, тем она более упорядочена. Мерой неуравновешенности H_1 , или абсолютной организованности, служит разность между максимальной неопределенностью и текущей (табл. 1) [14]. По мнению Ю.Г. Пузаченко [15], это выражение определяет степень доминантности. Чем больше максимально возможное разнообразие отличается от рассчитанного, тем выше доминирование какого-либо одного типа элементарных территориальных единиц.

Для выделенных бассейнов трансграничной территории бассейна р. Туманная минимальное значение $H_{\max}$ (2.58) присуще бассейнам № 15_2, 16 и 19 – все они находятся в пределах КНДР (табл. 4). Максимальное значение $H_{\max}$ (3.58) характерно для бассейнов № 5, 12 и 13 – в пределах КНР. Можно отметить, что показатель напрямую зависит от количества типов использования земель в бассейне – лидирующие позиции по данному показателю занимают бассейны с наибольшим

количеством представленных типов земель.

Среднее значение меры абсолютной организованности H_1 для всего бассейна р. Туманная составляет 2.46. Высокие значения H_1 имеют бассейны, расположенные в КНР (рис. 3). Максимальный показатель (3.33) характерен для бассейна № 3; для бассейнов № 6_1 и 9 он равен 3.16 и 3.10 соответственно. Все бассейны с низким значением H_1 находятся на территории КНДР. Минимальное значение присуще бассейну № 16 – 1.83, а бассейнам № 20 и 6_2 – 1.86 и 1.98 соответственно.

Среднее значение выравненности (E) составляет 0.22 (табл. 4), что говорит о достаточной эффективности хозяйственной деятельности. По определению выравненности [9], чем меньше значение этого показателя, тем эффективнее хозяйственная деятельность. Таким образом, в пределах бассейна р. Туманная наилучшим состоянием хозяйства отмечаются бассейны № 14, № 3 и № 9, расположенные в пределах КНР. Им присущи наименьшие значения выравненности – 0.03, 0.04 и

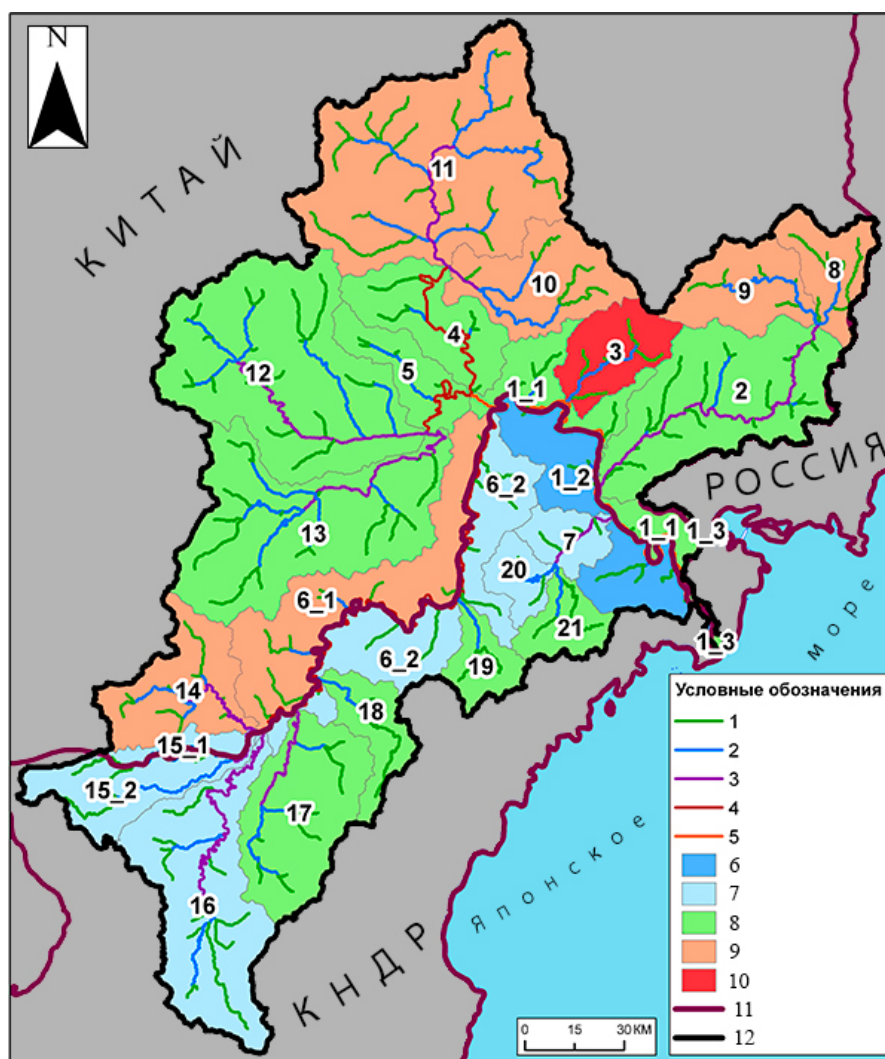


Рис. 3. Ранжирование территории бассейна р. Туманная по значению показателя абсолютной организации ландшафтов. Порядок водотоков: 1 – приток I порядка, 2 – приток II порядка, 3 – приток III порядка, 4 – приток IV порядка, 5 – приток V порядка. Значение показателя абсолютной организации ландшафтов: 6 – минимальное, 7 – низкое, 8 – среднее, 9 – высокое, 10 – максимальное; 11 – граница бассейна р. Туманная; 12 – государственная граница. Цифрами от 1 до 21 обозначены выделенные бассейны.

Fig. 3. Ranking of the territory of the Tumannaya River basin according to the value of the absolute organization of landscapes indicator. The order of watercourses (tributaries): 1 – tributary of the 1st order, 2 – 2nd order, 3 – 3rd order, 4 – 4th order, 5 – 5th order. Value of absolute organization of landscapes: 6 – minimum, 7 – low, 8 – average, 9 – high, 10 – maximum. 11 – boundary of the Tumannaya River basin; 12 – state border. Numbers from 1 to 21 indicate selected basins.

0.05 соответственно. Максимальные значения показателя присущи бассейнам № 1_2 (0.48) и 6_2 (0.44) на территории КНДР. В их пределах доминируют сельскохозяйственные земли и земли населенных пунктов.

Уменьшение неопределенности можно связать с увеличением параметра организации системы, а мерой упорядоченности (иначе относительной организации) R будет служить разность между единицей и мерой однообразия, или относительной энтропией (табл. 1) [9].

Показатель относительной организации ландшафтов R является наиболее информативным. Диапазон его значений находится в интервале от 0 до 1. При минимальном значении показателя система считается полностью детерминированной, при максимальном – наиболее организованной и сбалансированной [13].

Наибольшим значением показателя R (более 0.9) характеризуются бассейны № 3, 8, 9 и 14 – все в пределах КНР (табл. 4). Минимальное для исследуемых бассейнов значение составляет 0.7, оно характерно

для бассейнов № 1_1, 1_2, 6_2, 7, 12 и 13. Таким образом, можно сделать вывод о достаточной организованности и сбалансированности территории трансграничного бассейна в целом.

Коэффициент ландшафтной раздробленности K позволяет оценить отношение среднего размера площади конкретного типа к площади исследуемой территории. Распределение значения данного показателя сходно с распределением коэффициента сложности. Наибольшее значение (3.7 и 3.3) характерно для бассейнов № 15_1 (КНДР) и 1_3 (Россия) соответственно. Бассейн № 15_1 и бассейн № 1_3, как уже отмечалось выше, являются отделенными государственной границей частями бассейнов I–III порядка. Это объясняет разорванность и раздробленность многих выделенных полигонов. Наименьшее значение коэффициента отмечается для бассейнов № 12 и 13 – 0.08 и 0.09 соответственно. Это бассейны на территории Китая со свойственными им низкими значениями средней площа-

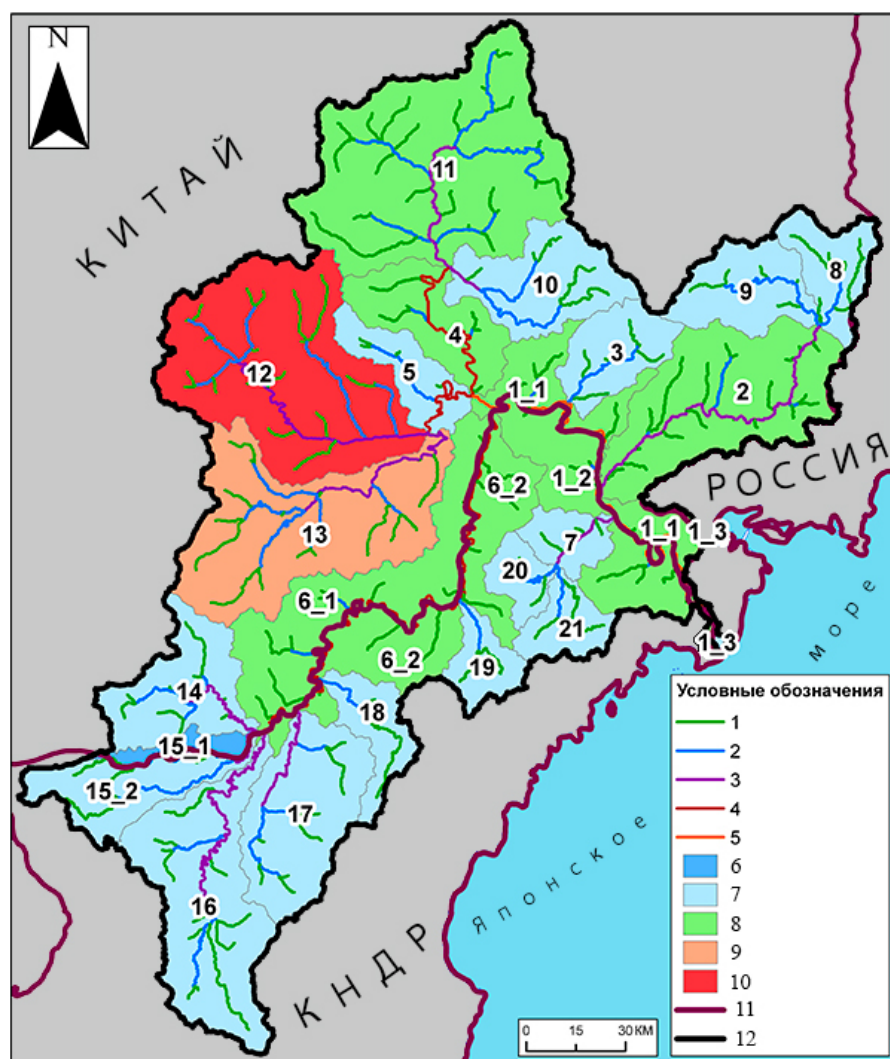


Рис. 4. Ранжирование территории бассейна р. Туманная по значению индекса Маргалефа. Порядок водотоков: 1 – приток I порядка, 2 – приток II порядка, 3 – приток III порядка, 4 – приток IV порядка, 5 – приток V порядка. Значение индекса Маргалефа: 6 – минимальное, 7 – низкое, 8 – среднее, 9 – высокое, 10 – максимальное; 11 – граница бассейна р. Туманная; 12 – государственная граница. Цифрами от 1 до 21 обозначены выделенные бассейны.

Fig. 4. Ranking of the territory of Tumannaya River basin by the Margalef index value. The order of watercourses (tributaries): 1 – tributary of the 1st order, 2 – 2nd order, 3 – 3rd order, 4 – 4th order, 5 – 5th order. Margalef index value: 6 – minimum, 7 – low, 8 – average, 9 – high, 10 – maximum. 11 – boundary of the Tumannaya River basin; 12 – state border. Numbers from 1 to 21 indicate selected basins.

ди контура и высокими значениями средней площади полигона.

Оценка *разнообразия структуры использования земель* осуществлялась с помощью методики Р. Маргалефа [10]. Под разнообразием понимаются число и частота встречаемости типов использования земель в пределах какого-либо региона, отражающие структурно-генетическую неоднородность территории. Как отмечают в своей работе Е.А. Позаченюк и А.А. Агиенко [16], существует два подхода для определения разнообразия. Один из них связан с использованием космических снимков и материалов дистанционного зондирования. Другой, который был применен в настоящей работе, – качественный и количественный анализ структуры использования земель территории с использованием построенных карт и различных математико-статистических коэффициентов [12, 16].

Среднее значение *индекса Маргалефа* D_{mg} составляет 44.74 (табл. 4). Максимальные значения – 155.62 и 142.33 – характерны для бассейнов № 12 и 13 соответственно (рис. 4). Эти бассейны в китайской части характеризуются не только высоким разнообразием, но также сложностью и раздробленностью. О наименьшем разнообразии говорят значения от 4.72 до 9.59, свойственные бассейнам № 1_3, 3, 15_1, 15_2, 18, 19 и 21. Стоит отметить устойчивую взаимосвязь показателя с площадью бассейнов – чем больше площадь, тем выше значение индекса.

Показатели количественной оценки позволяют объективно оценить сложность и разнообразие структуры использования земель территории. Знание величин ландшафтного разнообразия, раздробленности, сложности и организации ландшафтов важно с практической точки зрения. Так, чем выше мера разнообразия и выравненности, тем условия более благоприятны для организации сохранения территории. Чем ниже – тем территория более благоприятна для эффективной хозяйственной деятельности (преимущественно монофункционального хозяйства) [15, 17]. В свою очередь, сравнение таких показателей с коэффициентом естественной защищенности позволяет соотнести настоящее состояние территории с ее потенциалом.

Таким образом, для бассейна р. Туманная можно определить достаточное разнообразие структуры использования, но в пределах центральной прирусловой части бассейна. Для периферийной части отмечается потенциал развития хозяйственной деятельности. Различия показателей для частей бассейна в пределах КНР, КНДР и РФ позволяют наметить потенциальные направления сотрудничества в области природопользования, экономической и природоохранной деятельности.

Заключение

Трансграничный бассейн р. Туманная характеризуется достаточно высоким уровнем естественной защищенности территории. В первую очередь это подтверждается высокой долей естественных типов использования земель в пределах всех выделенных бассейнов. Об этом также свидетельствует баланс в распределении антропогенной нагрузки по территории бассейна и относительная устойчивость территории.

Среднее значение коэффициента естественной защищенности составляет 0.9, что значительно выше критического уровня (0.5).

В периферийных частях бассейна, в высокогорных районах КНР и КНДР, отмечается наибольшее значение коэффициента естественной защищенности.

Для большинства бассейнов притоков I, II и III порядка характерно разнообразие, сложность и дробность структуры использования земель. Это подтверждается значениями ряда количественных показателей. Так, для припойменной центральной части бассейна характерны наибольшие значения энтропийной меры сложности, а также производных показателей. Высокие значения относительной организации ландшафта и коэффициента ландшафтной раздробленности в этой части бассейна подтверждают освоенность территории и развитость инфраструктуры. Индекс Маргалефа, характеризующий разнообразие структуры землепользования, имеет более высокие значения в пределах КНР, для КНДР характерны наименьшие его значения.

В силу того, что российская часть занимает менее 1 % бассейна р. Туманная и находится

в непосредственной близости к государственной границе, значения многих показателей выделяются на фоне всего бассейна. Так, значения коэффициента сложности, энтропийной меры сложности ландшафтного рисунка и ее производных, выравненности рангового распределения и относительной организации, а также индекса Маргалефа приближены к средним значениям или являются наименьшими среди всех участков бассейна. В свою очередь, индекс дробности и коэффициент ландшафтной раздробленности имеют высокие показатели в силу разорванности многих полигонов использования земель государственной границей и границей бассейна. Высокое значение коэффициента естественной защищенности подтверждает относительную устойчивость территории.

Таким образом, периферийная, более горная часть бассейна, занятая лесными землями, менее подверженными антропогенному воздействию, является сбалансированным естественным каркасом территории. Так как бассейн является единой геосистемой, проявление хозяйственной деятельности в пределах КНР и КНДР сказывается на российской приустьевой части бассейна, а также в пределах акватории в непосредственной близости к государственной границе [1]. Можно отметить, что более освоенная и развитая припойменная часть притоков и русла р. Туманная в пределах трех стран требует большего внимания и контроля за деятельностью. В данном случае именно бассейновый подход является определяющим в разработке международной региональной политики в пределах трансграничной территории. В настоящее время на исследуемой трансграничной территории уже существуют несколько направлений сотрудничества – транспортное, экономическое, природоохранное. В дальнейшем исследовании планируется оценить возможности развития международных отношений на основе анализа структуры использования земель в пределах бассейна р. Туманная.

Список литературы

1. Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Павлова Г.Ю., Тищенко П.П., Лобанов, В.Б., Марьяш А.А., Михайлик Т.А., Сагалаев С.Г., Сергеев А.Ф., Тибенко Е.Ю.

- и др. **2018**. Гидрохимия эстуария реки Туманной (Японское море). *Океанология*, 58(2): 192–204. doi:10.7868/S003015741802003X; EDN: XMRPXN
2. Корытный Л.М. **2017**. Бассейновая концепция: от гидрологии к природопользованию. *География и природные ресурсы*, 2: 5–16. EDN: YSKUWF
3. Бакланов П.Я., Ганзей С.С. **2008**. *Трансграничные территории: проблемы устойчивого природопользования*. Владивосток: Дальнаука, 216 с. URL: https://www.studmed.ru/baklanov-pya-ganzei-ss-transgranichnye-territorii-problemy-ustoychivogo-prirodopolzovaniya_2fc359a8068.html
4. Каширская А.В. **2014**. Роль Дальнего Востока России в региональном сотрудничестве стран Северо-Восточной Азии. *Общество. Среда. Развитие*, 2(31): 65–69. EDN: QLHNJQ
5. Бакланов П.Я., Ганзей С.С., Качур А.Н. (ред.) **2002**. *Трансграничный диагностический анализ: RAS/98/G31. Программа развития ООН. Фонд Global Environment Facility. Стратегическая программа действий для р. Туманной*. Владивосток: Дальнаука, 253 с.
6. Николаев В.А. **2006**. *Ландшафтоведение: семинарские и практические занятия*. М.: Геогр. факультет МГУ, 208 с.
7. Маслова М.Н. **2022**. Структура использования земель бассейна реки Туманная. *Успехи современного естествознания*, 8: 52–58. <https://doi.org/10.17513/use.37868>; EDN: PQQVWV
8. Кочуров Б.И. **1999**. *Геоэкология: экодиагностика и эколого-хозяйственный баланс территории*. Смоленск: СГУ, 154 с. URL: <http://www.rpp-msu.ru/workspace/uploads/files/kochurov-bi-geoekologiya-ekodi-5dcfbb9fbba64.pdf>
9. Викторов А.С. **1986**. *Рисунок ландшафта*. М.: Мысль, 177 с.
10. Маргалеф Р. **1992**. *Облик биосферы*. М.: Наука, 215 с.
11. Пузаченко Ю.Г. **2004**. *Математические методы в экологических и географических исследованиях*. М.: Academia, 407 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/11573>
12. Соколов А.С. **2014**. Ландшафтное разнообразие: теоретические основы, подходы и методы изучения. *Геополитика и экогеодинамика регионов*, 10(1): 208–213. EDN: VQDVPRX
13. Геренчук К.И., Гораш И.К., Топчиев А.Г. **1969**. Методика определения некоторых параметров морфологической структуры ландшафтов. *Известия АН СССР. Сер. геогр.*, 5: 102–109.
14. Плюсин В.М. **2003**. *Ландшафтный анализ горных территорий*. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 257 с. EDN: ТВАЛКР
15. Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н., Алещенко Г.М. **2002**. Разнообразие ландшафта и методы его измерения. В кн.: *География и мониторинг биоразнообразия*. М.: Изд-во НУМЦ, с. 76–163.

16. Позаченюк Е.А., Агиенко А.А. **2017**. Оценка ландшафтного разнообразия Алуштинского амфитеатра. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология*, 3(69), 2: 102–116. EDN: YLMCZ
17. Черных Д.В. **2011**. Количественная оценка сложности и разнообразия ландшафтного покрова Русского Алтая. *Известия Алтайского государственного университета. Биол. науки*, 3-2(71): 60–65. EDN: OKLTTL
7. Maslova M.N. **2022**. Structure of land use in the Tumannaya river basin. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*, 8: 52–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37868>
8. Kochurov B.I. **1999**. [*Geoecology: ecodiagnosics and ecological and economic balance of the territory*]. Smolensk: SGU Publ., 154 p. (In Russ.).
9. Viktorov A.S. **1986**. [*Landscape pattern*]. Moscow: Mysl', 177 p. (In Russ.).
10. Margalef R. **1992**. [*The appearance of the biosphere*]. Moscow: Nauka, 215 p. (In Russ.).
11. Puzachenko Yu.G. **2004**. [*Mathematical methods in ecological and geographical research*]. Moscow: Academia, 407 p. (In Russ.).
12. Sokolov A.S. **2014**. Landscape diversity: theoretical bases, approaches and studying methods. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov = Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*, 10(1): 208–213. (In Russ.).
13. Gerenchuk K.I., Gorash I.K., Topchiev A.G. **1969**. [Methods for determining some parameters of the morphological structure of landscapes]. *Izvestiya AN SSSR. Geography Series*, 5: 102–109. (In Russ.).
14. Plyusnin V. M. **2003**. *Landscape analysis of mountain areas*. Irkutsk: Publ. House of the Institute of Geography SB RAS, 257 p. (In Russ.). EDN: TBAJKP
15. Puzachenko Yu.G., D'yakonov K.N., Aleshchenko G.M. **2002**. [Landscape diversity and methods of its measurement]. In: *Geography and monitoring of biodiversity*. Moscow: NUMC: 76–163. (In Russ.).
16. Pozachenyuk E.A., Agienko A.A. **2017**. Assessment of the landscape diversity of Alushta amphitheater. *Uchyonye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. = Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*, 3(69), no. 2: 102–116. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-landshaftnogo-raznoobraziya-alushtinskogo-amfiteatra/viewer>
17. Chernykh D.V. **2011**. Quantitative assessment of complexity and landscape diversity of the Russian Altai. *Izvestiya of Altai State University*, 3-2(71): 60–65. (In Russ.).

References

1. Tishchenko P.Ya., Semkin P.Yu., Pavlova G.Yu., Tishchenko P.P., Lobanov V.B., Marjash A.A., Mikhailik T.A., Sagalaev S.G., Sergeev A.F., Tibenko E.Yu. et al. **2018**. Hydrochemistry of the Tumen River estuary, Sea of Japan. *Oceanology*, 58(2): 175–186. <https://doi.org/10.1134/s0001437018010149>
2. Korytny L.M. **2017**. Basin concept: from hydrology to nature management. *Geography and Natural Resources*, 38(2): 111–121. <https://doi.org/10.1134/s1875372817020019>
3. Baklanov P.Ya., Ganzey S.S. **2008**. *Trans-boundary territories: the problems of sustainable nature use*. Vladivostok: Dalnauka, 216 p. (In Russ.). URL: https://www.studmed.ru/baklanov-pya-ganzey-ss-transgranichnye-territorii-problemy-ustoychivogo-prirodopolzovaniya_2fc359a8068.html
4. Kashirskaya A.V. **2014**. [The role of the Russian Far East in the regional cooperation of the countries of Northeast Asia]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie = Terra Humana*, 2: 65–69. (In Russ.).
5. Baklanov P.Ya., Ganzey S.S., Kachur A.N. (Eds) **2002**. [*Transboundary diagnostic analysis: Tumen River Strategic Action Program (RAS/98/G31. United Nations Development Program. Global Environment Facility Foundation)*]. Vladivostok: Dalnauka, 231 p. (In Russ.).
6. Nikolaev V.A. **2006**. [*Landscape science: Seminars and practical classes*]. Moscow: Faculty of Geography of Moscow State University, 208 p. (In Russ.).

Об авторе

Маслова Марина Николаевна (<https://orcid.org/0009-0008-5916-8779>), младший научный сотрудник Информационно-картографического центра, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, maslova.marina.99@mail.ru

About the Author

Maslova, Marina N. (<https://orcid.org/0009-0008-5916-8779>), Junior Researcher of the Information and Cartographic Center, Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, maslova.marina.99@mail.ru

Поступила 17.07.2023

Принята к публикации 13.09.2023

Received 17 July 2023

Accepted 13 September 2023