

**Геосистемы переходных зон**  
**Том 3 № 4 2019 Октябрь – Декабрь**

**Geosystems of Transition Zones**  
**Vol. 3 N 4 2019 October – December**

**Научный журнал**

**Scientific journal**

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

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

Журнал основан в 2016 г.

Founded in 2016

Выходит 4 раза в год

Published 4 times a year

*Главный редактор* член-корреспондент РАН **Б.В. Левин**  
*Editor-in-Chief* Corresponding Member of the RAS **Boris W. Levin**

*Редколлегия*

*Editorial Board*

Академик РАН <b>В.В. Адушкин</b>	<b>V.V. Adushkin</b> , Academician
Д-р техн. наук <b>А.И. Алексанин</b>	<b>A.I. Alexanin</b> , Dr. Eng. Sci.
<i>Зам. гл. ред.</i> , д-р физ.-мат. наук <b>Л.М. Богомолов</b>	<b>L.M. Bogomolov</b> , Dr Phys.-Math. Sci., <i>Deputy Ed.-in-Ch.</i>
Д-р физ.-мат. наук <b>В.Г. Быков</b>	<b>V.G. Bykov</b> , Dr. Phys.-Math. Sci.
Д-р геол.-минер. наук <b>В.М. Гранник</b>	<b>V.M. Grannik</b> , Dr. Geol.-Miner. Sci.
Д-р геогр. наук <b>П.О. Завьялов</b>	<b>P.O. Zavyalov</b> , Dr. Geogr. Sci.
Д-р физ.-мат. наук <b>Д.П. Ковалев</b>	<b>D.P. Kovalev</b> , Dr. Phys.-Math. Sci.
Д-р физ.-мат. наук <b>Г.Г. Кочарян</b>	<b>G.G. Kocharyan</b> , Dr. Phys.-Math. Sci.
Д-р физ.-мат. наук <b>А.А. Куркин</b>	<b>A.A. Kurkin</b> , Dr. Phys.-Math. Sci.
Академик РАН <b>В.А. Левин</b>	<b>V.A. Levin</b> , Academician
Д-р геогр. наук <b>В.А. Лучин</b>	<b>V.A. Luchin</b> , Dr. Geogr. Sci.
Д-р физ.-мат. наук <b>Ю.В. Марапугец</b>	<b>Yu.V. Marapulets</b> , Dr. Phys.-Math. Sci.
Д-р геол.-минер. наук <b>А.И. Обжиров</b>	<b>A.I. Obzhirov</b> , Dr. Geol.-Miner. Sci.
Д-р геогр. наук <b>С.А. Огородов</b>	<b>S.A. Ogorodov</b> , Dr. Geogr. Sci.
Д-р физ.-мат. наук <b>О.А. Плехов</b>	<b>O.A. Plekhov</b> , Dr. Phys.-Math. Sci.
<i>Отв. секретарь</i> , канд. физ.-мат. наук <b>А.С. Прытков</b>	<b>A.S. Prytkov</b> , Dr Phys.-Math. Sci., <i>Executive Secretary</i>
Д-р физ.-мат. наук <b>Ю.Л. Ребеский</b>	<b>Yu.L. Rebetskiy</b> , Dr. Phys.-Math. Sci.
Д-р физ.-мат. наук <b>М.В. Родкин</b>	<b>M.V. Rodkin</b> , Dr. Phys.-Math. Sci.
Д-р физ.-мат. наук <b>А.К. Рыбин</b>	<b>A.K. Rybin</b> , Dr. Phys.-Math. Sci.
Д-р физ.-мат. наук <b>Е.В. Сасорова</b>	<b>E.V. Sasorova</b> , Dr. Phys.-Math. Sci.
Д-р физ.-мат. наук <b>Ю.И. Троицкая</b>	<b>Yu.I. Troitskaya</b> , Dr. Phys.-Math. Sci.
Д-р физ.-мат. наук <b>П.П. Фирстов</b>	<b>P.P. Firstov</b> , Dr. Phys.-Math. Sci.
Д-р геол.-минер. наук <b>Р.Б. Шакиров</b>	<b>R.B. Shakirov</b> , Dr. Geol.-Miner. Sci.
Д-р физ.-мат. наук <b>Г.В. Шевченко</b>	<b>G.V. Shevchenko</b> , Dr. Phys.-Math. Sci.
Академик РАН <b>В.В. Ярмолюк</b>	<b>V.V. Yarmolyuk</b> , Academician

*Ответственный за номер* **Л.М. Богомолов**  
*Responsible to Present Volume* **Leonid M. Bogomolov**

*Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-73243 от 13.07.2018 г.*  
*(Свид-во о первоначальной регистрации ПИ № ТУ27-00578 от 11.07.2016)*

*Зав. редакцией* **В.Р. Ковалишина**  
*Редактор английских текстов*  
**Л.М. Богомолов**

*Staff Editor* **Victoryia R. Kovalishina**  
*Editor of the English translation*  
**Leonid M. Bogomolov**

## Содержание

### **Геотектоника и геодинамика.**

#### **Структурная геология**

*Чон Тхань Фи, Р.Б. Шакиров, Н.С. Сырбу.* Характеристики фаз тектонической активности вдоль зоны разлома Цхао Банг – Ти Иен, разрез Ти Иен – Ланг Сон, северо-восточная часть, Вьетнам .....345

#### **Геофизика, сейсмология**

*Д.А. Сафонов, Т.А. Фокина, Н.С. Коваленко.* Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2018 году ...364

*А.С. Закупин, Н.В. Богинская, М.Ю. Андреева.* Методические аспекты исследования сейсмических последовательностей методом СРП (саморазвивающиеся процессы) на примере Невельского землетрясения на Сахалине .....377

*П.А. Каменев, Д.В. Костылев, Н.В. Богинская, А.С. Закупин.* Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования .....390

#### **Океанология. Геоморфология**

*В.М. Кайстренко.* Особенности использования данных о палеоцунами для оценок цунамиопасности .....403

Краткое сообщение

*В.М. Кайстренко, Н.Г. Разжигаева, Л.А. Ганзей, А.О. Горбунов, Ю. Нисимура.* Проявления цунами 1 августа 1940 г. в Каменке, Приморье (новые данные о давнем историческом цунами) .....417

Краткое сообщение

*В.В. Афанасьев.* О новом типе эолового морфогенеза на вулканогенных берегах (о. Итуруп, Большая Курильская гряда) .....423

#### **Геоэкология**

*Р.В. Жарков, Д.Н. Козлов, В.В. Еришов, Н.С. Сырбу, О.А. Никитенко, Г.В. Устюгов.* Паромайские термальные источники острова Сахалин: современное состояние и перспективы использования .....428

*Р.В. Жарков, Д.Н. Козлов, Б.И. Челнокова.* Физические и химические особенности сапропелевых грязей некоторых пресноводных озер Елизовского района Камчатского края (Россия) .....438

#### **От редколлегии**

Правила оформления и публикации рукописей в журнале «Геосистемы переходных зон» .....448

Тематический указатель публикаций в журнале в 2019 г. (том 3) .....454

Авторский указатель публикаций в журнале в 2019 г. (том 3) .....458

---

Адрес редакции: ИМГиГ ДВО РАН  
ул. Науки, 1 Б, Южно-Сахалинск, 693022  
Тел./факс: (4242) 791517;  
E-mail: gtrz-journal@mail.ru

---

## Content

### **Geotectonics and geodynamics.**

#### **Structural geology**

*Truong Thanh Phi, R.B. Shakirov, N.S. Syrbu.* Characteristics of tectonic activity phases along The Cao Bang-Tien Yen fault zone, Tien Yen-Lang Son section, Northeastern part, Vietnam .....345

#### **Geophysics, seismology**

*D.A. Safonov, T.A. Fokina, N.S. Kovalenko.* Seismicity of the South Far East of Russia in 2018 .....364

*A.S. Zakupin, N.V. Boginskaya.* Methodological aspects of the study of seismic sequences by SDP (self-developing processes) on the example of the Nevel'sk earthquake on Sakhalin .....377

*P.A. Kamenev, D.V. Kostylev, N.V. Boginskaya, A.S. Zakupin.* Geophysical surveys in the southern part of the Central Sakhalin Fault based on new integrated network .....390

#### **Oceanology. Geomorphology**

*V.M. Kaistrenko.* Peculiarity of using the paleotsunami data for the tsunami hazard estimation .....403

Short report

*V.M. Kaistrenko, N.G. Razjigaeva, L.A. Ganzey, A.O. Gorbunov, Yu. Nishimura.* The manifestation of tsunami of August 1, 1940 in the Kamenka settlement, Primorye (new data concerning the old tsunami) .....417

Short report

*V.V. Afanas'yev.* A new type of aeolian morphogenesis on volcanic shores (Iturup Island, Great Kuril Ridge) .....423

#### **Geoecology**

*R.V. Zharkov, D.N. Kozlov, V.V. Ershov, N.S. Syrbu, O.A. Nikitenko, G.V. Ustyugov.* Paromay thermal springs of Sakhalin Island: modern state and prospects for use ....428

*R.V. Zharkov, D.N. Kozlov, B.I. Chelnokova.* Physical and chemical features of some freshwater lakes in the Elizovo district of the Kamchatka (Russia) .....438

#### **Editorial Note**

The rules for the authors of the journal "Geosystems of Transition Zones" .....448

Topical index of articles published in the Journal in 2019 (volum 3) .....456

Author Index of Journal Publications in 2019 (volum 3)....458

---

Editorial Office Address: IMGG FEB RAS  
1B, Nauki Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022  
Tel./Fax: (4242) 791517  
E-mail: gtrz-journal@mail.ru

---

## Characteristics of tectonic activity phases along The Cao Bang – Tien Yen fault zone, Tien Yen – Lang Son section, Northeastern part, Vietnam

© 2019 *Truong Thanh Phi*<sup>1</sup>, *Renat B. Shakirov*<sup>\*2</sup>, *Nadezhda S. Syrбу*<sup>\*\*2</sup>

<sup>1</sup>*Hanoi University of Natural Resources and Environment, Vietnam*

<sup>2</sup>*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia*

<sup>\*</sup>*E-mail: ren@poi.dvo.ru*

<sup>\*\*</sup>*E-mail: syrбу@poi.dvo.ru*

**Abstract.** The Cao Bang – Tien Yen (CB-TY) fault zone, Tien Yen – Lang Son (TY-LS) section is about 100 km long, running in the NW-SE direction, the northeastern part of the Red River fault zone. The field survey is conducted at 21 locations, including the description of lithological characteristics, fracture orientation measurement, stratigraphic displacement, and the evidence of striation motion on the fault surface. The analytical results of 59 striations on the fault surface along the CB-TY fault zone, TY-LS section identified that the lateral strike-slip stress states with the four compression phases E-W, NE-SW, NW-SE and N-S. From evidences obtained in the field, together with the comparison of previous studies, the main tectonic phases are arranged in the order of directions: 1) NW-SE; 2) E-W; 3) NE-SW and 4) N-S. In particular, the first compression phase of the NW-SE direction severely destroyed the old rocks of the Jurassic age and earlier, encountered at many survey locations along the CB-TY fault zone, TY-LS section; the second compression phase of the E-W direction occurred during the Cenozoic period, caused the left displacement of the Red River fault zone in the Oligocene-Miocene period and the left motion along the CB-TY fault zone formed the Neogen sedimentary basins: Cao Bang, That Khe, Lang Son, Na Duong; the third compression phase of NE-SW direction occurred during the Mid-late Miocene, caused a tectonic inversion of the NW-SE faults in the northern part of the Red River basin, which are located in the southeast area of the CB-TY fault zone; the final compression phase of the N-S direction, occurred during the Pliocene-Quaternary period, caused the right motion along the CB-TY fault zone and the Red River fault zone.

**Keywords:** CB-TY fault zone, Red River fault zone, Cao Bang basin, Neogene Na Duong basin, TY-LS section, thermal springs.

*For citation:* Truong Thanh Phi, Shakirov R.B., Syrбу N.S. Characteristics of tectonic activity phases along The Cao Bang – Tien Yen fault zone, Tien Yen – Lang Son section, Northeastern part, Vietnam. *Geosystems of Transition Zones*. 2019, vol. 3, no. 4, pp. 345–363. (In English, abstract Russian) <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.345-363>

## Характеристики фаз тектонической активности вдоль зоны разлома Цхао Банг – Ти Иен, разрез Ти Иен – Ланг Сон, северо-восточная часть, Вьетнам

*Чон Тхань Фи*<sup>1</sup>, *Р.Б. Шакиров*<sup>\*2</sup>, *Н.С. Сырбу*<sup>\*\*2</sup>

<sup>1</sup>*Ханойский университет природных ресурсов и окружающей среды, Вьетнам*

<sup>2</sup>*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия*

<sup>\*</sup>*E-mail: ren@poi.dvo.ru*

<sup>\*\*</sup>*E-mail: syrбу@poi.dvo.ru*

**Реферат** (расширенный). Разлом Цхао-Банг – Ти-Иен, разрез Ти-Иен – Ланг-Сон имеет длину около 100 км, он простирается в северо-западном – юго-восточном направлении в северо-восточной части разломной зоны Красной Реки. Полевые исследования проводились на 21-м участке. Они включали описание литологических характеристик, измерение ориентации трещин, стратиграфическое смещение и оценку признаков движения на поверхности разлома. Результаты анализа

59 полос скольжения на поверхности разлома вдоль зоны Цхао-Банг – Ти-Иен, разреза Ти-Иен – Ланг-Сон показали, что боковое ударно-скользящее напряжение находится в состоянии сжатия по четырем фазам в направлениях В-З, СВ-ЮЗ, СЗ-ЮВ, С-Ю. По полученным данным в сравнении с предыдущими исследованиями были выделены основные направления тектонических движений: 1) СЗ-ЮВ; 2) В-З; 3) СВ-ЮЗ и 4) С-Ю. В частности, первая фаза сжатия СЗ-ЮВ простирается значительно нарушила древние породы эпохи юрского периода и более ранних. Такие участки встречаются во многих местах обследования вдоль зоны разлома Цхао-Банг – Ти-Иен, разреза Ти-Иен – Ланг-Сон. Вторая фаза сжатия В-З простирается произошла в кайнозойский период, вызвала левое смещение разломной зоны Красной Реки в олигоцен-миоценовом периоде и образовала осадочные неогеновые Цхао Банг, Тат Кхе, Ланг Сон, На Дуонг вдоль зоны разлома Цхао-Банг – Ти-Иен. Третья фаза сжатия СВ-ЮЗ простирается произошла во время среднего–позднего миоцена, вызвала тектоническую инверсию разломов СЗ-ЮВ направления в северной части бассейна Красной Реки, которые расположены в юго-восточной зоне разлома Цхао-Банг – Ти-Иен. Заключительная фаза сжатия С-Ю простирается, происходившая в плиоцен-четвертичный период, обусловила правое движение вдоль зоны разлома Цхао-Банг – Ти-Иен и разломной зоны Красной Реки.

В районе исследований на участке разлома Цхао-Банг – Ти-Иен и разломной зоны Красной Реки за период 2017–2019 гг. было опробовано 28 термальных источников, взято более 50 проб воды для газогеохимического и изотопного анализа. Пробы анализировали на содержание углеводородных газов (УВГ),  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ , He и  $H_2$ , проводили расчет потока метана в атмосферу с поверхности источников. Наиболее важным результатом исследований стало установление взаимосвязи режима термальных источников, термогенной газовой компоненты с геологической структурой Северного Вьетнама.

Основываясь на тектонических данных и результатах анализов химического состава природных газов, можно утверждать, что выходы термальных вод в районе северо-западного Вьетнама приурочены к активным зонам разломов. Смещения вдоль основных разломных зон способствуют увеличению проницаемости, облегчают продвижение тепла и термогенных газов к поверхности. Во всех исследованных термальных источниках, расположенных в зоне влияния рифта Красной Реки и разлома Цхао-Банг – Ти-Иен, обнаружены повышенные концентрации водорода (5900 нл/л), гелия (до 4252 нл/л), углекислого газа (до 72 %), метана (до 137 776 нл/л), что свидетельствует о геодинамической активности в районе исследований и о возможной поставке глубинного флюида по сверхглубоким проницаемым зонам.

Выходы термальных вод на северо-западе приурочены к системам разломов СЗ-ЮВ простирается: Сонг Да, Тхуан Чау, Сонг Хонг и Сонг Чау. Источники, расположенные в провинции Лао Кай, находятся в гранитном массиве Фансипан. Исследуемые источники в районе Северной Вьетнамской низменности (Ба Ви и Ким Бой) были обнаружены при разведочном бурении. В провинции Хоа Бинх (дельта Красной Реки), находящейся в отдаленных пригородах Ханоя к юго-востоку от его центра, зафиксированы концентрации углекислого газа в воде до 42 %. Также рассчитан поток метана с поверхности источника в атмосферу – 593 мкмоль/сутки.

В соседней провинции Фу То также зафиксированы высокие концентрации углекислого газа в воде – до 50 %. Концентрации метана повышены и достигают 2150 нл/л. Поток метана в атмосферу составляет 100–400 мкмоль/сутки. Температура воды одного из источника доходила до 43 °С.

Проблема газогеохимического режима термальных, карстовых и подземных вод Северного Вьетнама тесно связана с комплексной оценкой углеводородного потенциала и геоэкологической обстановки района рифта Красной Реки. В районе исследований распространены термальные источники, газовый состав которых известен в самых общих чертах. Между тем макро- и микрогазовые компоненты (углеводородные газы, кислород, азот, водород, гелий, углекислый газ и др.) содержат информацию о генезисе проницаемых систем земной коры, глубинных источниках газов, их влиянии на геохимию окружающих ландшафтов и других особенностях связи сквозных процессов литосфера–гидросфера–атмосфера.

**Ключевые слова:** разлом Цхао Банг – Ти Иен, разломная зона Красной Реки, бассейн Цхао Банг, бассейн На Дуонг, разрез Ти Иен – Ланг Сон, термальные источники.

*Для цитирования:* Чон Тхань Фи, Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С. Характеристики фаз тектонической активности вдоль зоны разлома Цхао Банг – Ти Иен, разрез Ти Иен – Ланг Сон, северо-восточная часть, Вьетнам. *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 4. С. 345–363. (На англ. яз., реферат на русском) <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.345-363>.

## **Introduction**

The CB-TY fault zone, TY-LS section is located in Quangninh and Langson province, Vietnam. The fault zone run in the SW-NE direction, parallel to a Red River fault zone, which located in the southern part, but it is smaller. On the satellite image, the fault zone is above 100 km long. The fault zone cut through the sedimentary rocks which determined as the age from Triassic to Cenozoic. Along the fault zone has a lot of fractures and the evidences of striation motion on fault surface. The studies of geology and geodynamics along the fault zone have been carried out from many decades of the last century [Vu Van Chinh, 2002; Le Trieu Viet, 2004].

Vu Van Chinh [Vu Van Chinh, 2002] suggested that the CB-TY fault zone formed in the late Paleozoic period and re-acted in the Mesozoic and Cenozoic. The analytical results of structural geology using the methods of analyzing the conjugate fracture system along the fault zone identified two main tectonic phases, corresponding to one early and one late phase. The early tectonic phase occurred in the late Paleogene – Miocene period, the compressive stress state with the E-W axis and the extension stress state with the N-S axis. The late tectonic phase occurred in the Pliocene – Quaternary period, the compressive stress state with the N-S axis and the extension stress state with the E-W axis. The other studies along the CB-TY fault zone is mainly considered as paleontology at the Cao Bang basin, Na Duong basin [Wysocka, 2009; Phan Dong Pha et al., 2011; Böhme et al., 2011; Böhme et al., 2013].

While, the studies of tectonic activity along the Red River fault zone, parallel to the CB-TY fault zone, which located in the southern part are considered much more by Vietnam and foreign geologists, typically, it is the study of P. Tapponnier et al. [Tapponnier et al., 1986]. He suggested that the left lateral strike-slip of the Red River fault system as the result of the India-Eurasia plate collision and determined within 30 Ma to 5.5 Ma, corresponding to the Oligocene-Miocene period, from analytical results of the seismic data in the northern part of the Red River basin [Rangin et al., 1995]. The left lateral strike-slip of the Red River fault system in the Oligocene-Miocene period also

mentioned by P. Leloup et al. [Leloup et al., 1995]. The offset left-lateral motion is estimated as between 200 and 800 km [Tapponnier et al., 1990; Sun et al., 2003].

Recently, the analyzing tributaries of the Red River fault system from Quaternary alluvial fans, river valley on Landsat and SPOT satellite images, detailed topographical maps and field observation has determined right-lateral offsets of stream channels range between 150 and 700 m [Phan Trong Trinh et al., 2012]. This is the results of the compression stress field of the N-S direction; E-W extension direction caused the right lateral strike-slip along the Red River fault system and, probably, began in the Pliocene time.

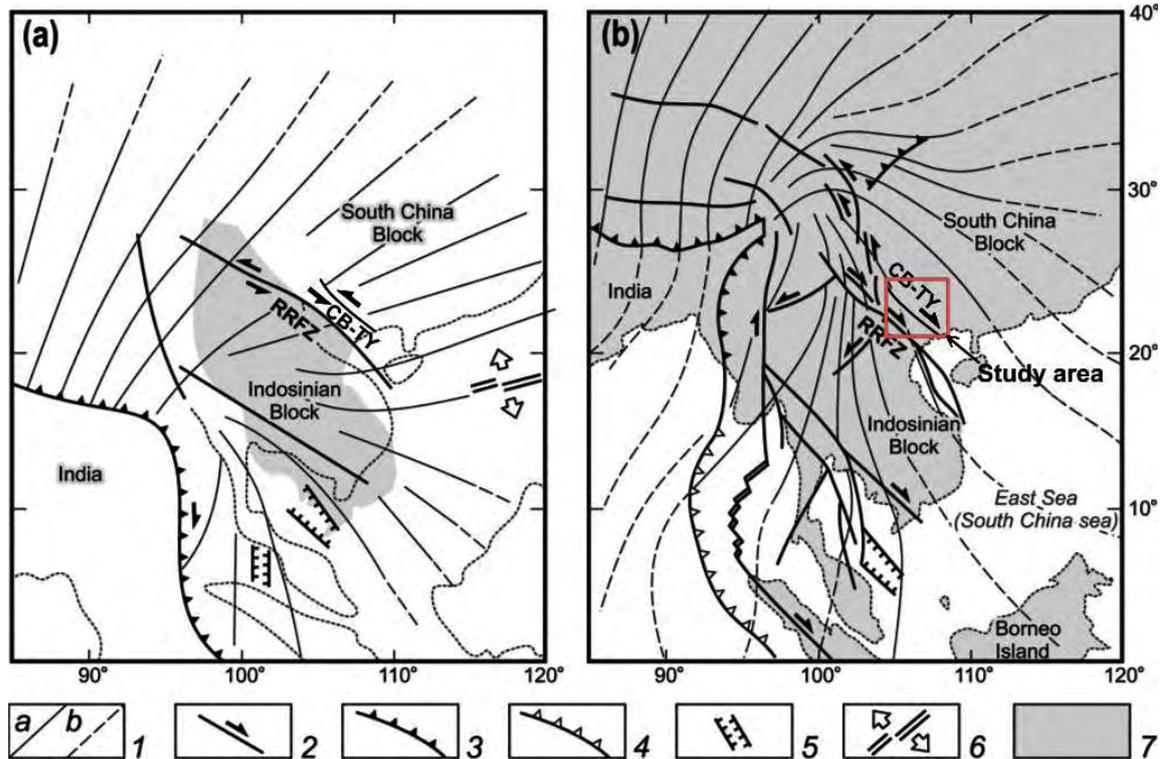
The another analysis also recognized that CB-TY fault zone, which is located in the northeastern part of the Red River fault system to be the right lateral strike-slip, results from the N-S compression direction using Landsat and SPOT satellite images, aerophotographs and 1:50.000 scale topographic maps [Phan Trong Trinh et al., 2012]. The relation to dextral strike-slip motion of the Red River fault system in the episode of Pliocene-Quaternary also confirmed in study of W. Zuchiewicz et al. [Zuchiewicz et al., 2013].

Similarly, the another study also indicated that predominantly sinistral strike slip of the Red River fault system formed as a result of ENE regional compression (80°) during the Oligocene-Miocene period and dextral strike slip of the Red River fault system formed as a result of NNW regional compression 330–350° during the Pliocene-Quaternary time [Kasatkin et al., 2014].

In this study, using the evidence of striation on the fault surface, the authors continue to make clearly tectonic phases along CB-TY fault zone, TY-LS section (Fig. 1).

Studying of thermal springs in Vietnam has begun only 10 years ago. The main attention is paid to the springs located in the central and southern Vietnam whereas sources in the northwest part of the country still remain the least studied.

As a result it was counted that Vietnam has 269 geothermal sources with water temperature higher than 30 °C. Among them 140 springs belong to warm and 80 to hot [Nguen Thac Cuong et al., 2005].



**Fig. 1.** Trajectories of the maximum compressive stress within the Indochina Peninsula from Pliocene to the present time [Kasatkin et al., 2014] modified from Huchon (1994).  
 (1) trajectories of the maximum compressive stress are directly related to the Indo-Eurasian plate collision (a) and its far-field effects (b); (2) faults and directions of displacement (arrows); (3) zone of continental collision; (4) subduction zone; (5) extension structures; (6) spreading zones; (7) current position of the land; Red River Fault System (RRFS); Cao Bang – Tien Yen fault (CB-TY).

In the northwest part of Vietnam about 79 hot springs are located which make 29.4 % of all thermal resources of the country. Thermal waters in this area have temperature on average 35–38 °C and belong to warm and moderately warm [Ngen Thac Cuong et al., 2005]. Thermal springs of the northwest of Vietnam are located in provinces Lai Chau, Son La, Hoa Binh, Yen Bai, Lao Cai and Phu Tho. All of them are associated with faulted zones NW-SE direction.

In April, 2016–2017 the staff of POI FEB RAS (Vladivostok) in collaboration with Institute of Marine Geology and Geophysics (IMGG VAST, Hanoi) has conducted researches on distribution of natural gases in thermal springs of northwest Vietnam and also a number of hydrological wells on Catba island in places of carbonate rock (Halonog Bay). Geological samples were sampled on the island also.

The researches have been successfully executed in full and are a part of a joint complex scientific geologic-geophysical research in the north of the South China Sea.

Data on distribution of methane, its homologs, nitrogen, carbon dioxide, helium and hydrogen in water of thermal sources of the northern Vietnam have been for the first time obtained. On the islands of Halong Bay unique geological samples are taken.

Water monitoring researches of the hydrological wells drilled in carbonate thicknesses are on Catba island. Study area is located on the site of the northeast frame of fault system of the Red River.

## Material and method

### Material

The geological survey is conducted at 21 locations along CB-TY fault zone, TY-LS section with the length of about 100 km. The data collected includes lithological characteristics, fracture orientation, fault orientation, stratigraphic displacement, striation on the fault surface. The location and character of the striations on the fault surface at each survey location are shown in Figure 2 and Table 1.

Characteristics of tectonic activity phases along The Cao Bang – Tien Yen fault zone

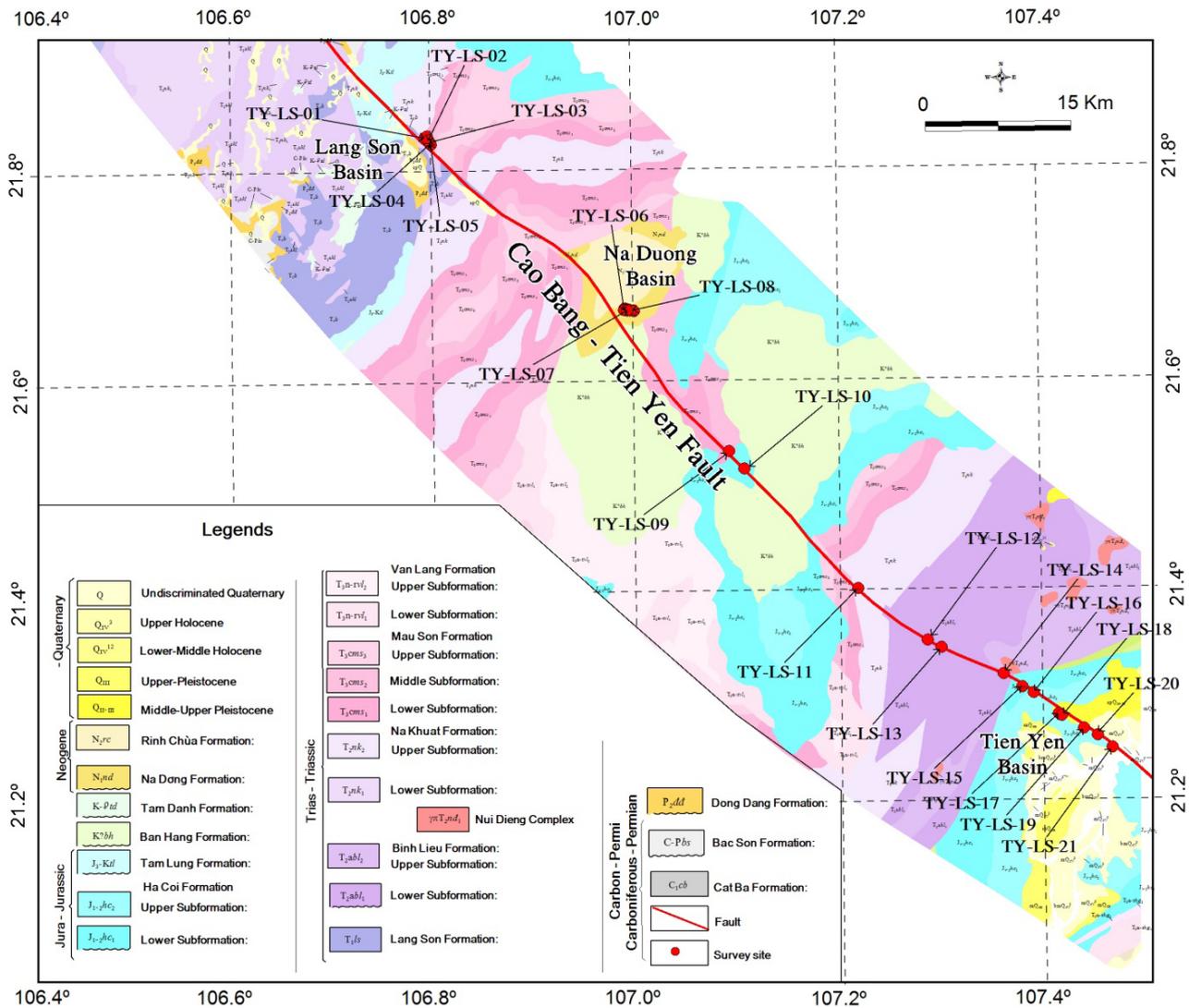


Fig. 2. Geological map, minimized from scale 1 : 200 000 and survey locations.

Table 1. Survey locations, fault orientation and striation description

No	Survey location index	Longitude	Latitude	Orientation	Fault description	Geological age
1	TY-LS-01	21°52'20.35"	106°46'26.82"	175/50 020/60	Left lateral strike-slip Right lateral strike-slip	$T_3cms_1$
2	TY-LS-02	21°52'10.77"	106°46'40.53"	105/75	Left-lateral/reverse, pitch = 30°	$T_3cms_1$
3	TY-LS-03	21°52'4.27"	106°46'43.5"	200/75	Right-lateral/normal, pitch = 10°	$T_3cms_2$
4	TY-LS-04	21°52'0.62"	106°46'47.13"	280/75	Normal	$T_3cms_2$
5	TY-LS-05	21°51'57.09"	106°46'48.96"	095/85	Right-lateral/normal, pitch = 50°	$T_3cms_2$
6	TY-LS-06	21°42'27.43"	106°58'14.37"	300/67	Normal	$N_1nd$
7	TY-LS-07	21°42'25.09"	106°58'25.40"	320/65	Normal	$N_1nd$
8	TY-LS-08	21°42'25.37"	106°58'47.49"	310/67	Right-lateral/reverse, pitch = 20°	$N_1nd$
				140/75	Right lateral strike-slip Right-lateral/reverse, pitch = 40°	

No	Survey location index	Longitude	Latitude	Orientation	Fault description	Geological age
9	TY-LS-09	21°34'22.8"	107°04'24"	180/45 180/45 190/70 215/70 190/60 170/50 230/75 160/40 195/55 180/70	Normal (phase 1) Left lateral strike-slip (phase 2) Left lateral strike-slip Left lateral strike-slip Normal Right-lateral/normal, pitch = 55° Right-lateral/reverse pitch = 35° Right-lateral/normal, pitch = 40° Normal Left-lateral/normal, pitch = 30°	$T_3cms_1$
10	TY-LS-10	21°33'23"	107°05'19"	220/65 230/40 170/64 255/52 140/50 010/85 000/70 355/80	Thrust Normal Normal Thrust Normal Right lateral strike-slip Right lateral strike-slip Normal	$J_{1-2}hc_1$
11	TY-LS-11	21°26'31"	107°12'00"	110/60	Right-lateral/normal, pitch = 35°	$T_2nk$
12	TY-LS-12	21°23'33.10"	107°16'6.99"	052/68 070/58	Left lateral strike-slip Left lateral strike-slip	$T_2abl_1$
13	TY-LS-13	21°23'7.19"	107°16'55.49"	065/80 090/79	Right-lateral/normal, pitch = 25° Right-lateral/normal, pitch = 10°	$T_2abl_1$
14	TY-LS-14	21°20'49"	107°21'43"	010/87 192/87 055/72 070/70	Right lateral strike-slip Left-lateral/reverse, pitch = 30° Normal Left lateral strike-slip	$T_2abl_1$
15	TY-LS-15	21°21'35"	107°20'36"	260/78 255/60 260/78 300/60 235/60	Right-lateral/normal, pitch = 35° Thrust Left lateral strike-slip Left-lateral/normal, pitch = 45° Thrust	$J_{1-2}hc_1$
16	TY-LS-16	21°20'29.29"	107°22'22.19"	065/60	Left-lateral/normal, pitch = 15°	$J_{1-2}hc_2$
17	TY-LS-17	21°19'17.69"	107°23'50.49"	030/75 295/80 340/70 318/72	Right-lateral/normal, pitch = 10° Left lateral strike-slip Right lateral strike-slip Left lateral strike-slip	$J_{1-2}hc_2$
18	TY-LS-18	21°19'9.50"	107°24'2.19"	075/84 075/84	Left-lateral/normal, pitch = 8° Normal	$J_{1-2}hc_2$
19	TY-LS-19	21°18'5.99"	107°25'9.89"	342/85 070/75 070/86	Left-lateral/reverse, pitch = 65° Left-lateral/normal, pitch = 58° Left-lateral/normal, pitch = 50°	$J_{1-2}hc_2$
20	TY-LS-20	21°18'1.90"	107°26'8.7"	060/80 350/77 035/85 340/77	Left-lateral/normal, pitch = 5° Right lateral strike-slip Left-lateral/normal, pitch = 12° Right lateral strike-slip	$J_{1-2}hc_2$
21	TY-LS-21	21°17'20.50"	107°27'1.40"	085/65 115/90 260/87	Right-lateral/normal, pitch = 24° Right-lateral/normal, pitch = 16° Right-lateral/normal, pitch = 10°	$J_{1-2}hc_2$

**Method**

To determine the overall sense of slip along the fault, we collected a fault-slip dataset from numerous discrete fault surfaces that occur along the CB-TY fault zone. A population of fault-slip data is collected by measuring the orientation of fault surfaces and associated fault striation. To interpret the population of fault-slip data and test for multiple overprinting deformations along the fault zone, we followed the graphical methods of R. Marrett and R. Allmendinger [Marrett, Allmendinger, 1990]. Measurements are collected along the fault where it crops out on the slope of 4B highway, run through two districts Quangninh and Langson.

The analyses of the striation of the fault surface at each survey location are conducted as shown in Figures 3–5.

Water was sampled from wells and underground thermal sources in 0.5 l bottle. The gas is extracted by vacuum degassing for subsequent analysis in the laboratory of POI FEB RAS. About 7–9 ml of gas was extracted from each 0.5 l of water. The determination error is no more than 5 %. The gas was analyzed in the laboratory of the POI FEB RAS on the gas chromatograph CrystalLux-4000M and portable gas chromatograph Gasochrom 2000.

Besides, the analyses also are carried out by counting the number of striation on the fault at each survey location (Fig. 5).

**Results**

The analyses of striation on a fault surface are conducted at 21 survey locations with 59 measurements. The analytical results showed that along the CB-TY fault zone, TY-LS section has strike-slip stress state with the compression direction of E-W, NE-SW, NW-SE and N-S, caused the left and right lateral strike – slip fault in the direction of NE-SW, NW-SE, N-S and E-W; the compression stress state of the N-S, E-W, NE-SW and NW-SE direction formed thrust fault in the E-W, N-S, NW-SE and NE-SW direction; the extension stress state of the E-W, N-S, NE-SW and NW-SE direction formed normal faults in the N-S, E-W, NE-SW and NW-SE direction. The statistical results also indicated that 05 compression stress states with the E-W direction, 04 compression stress states

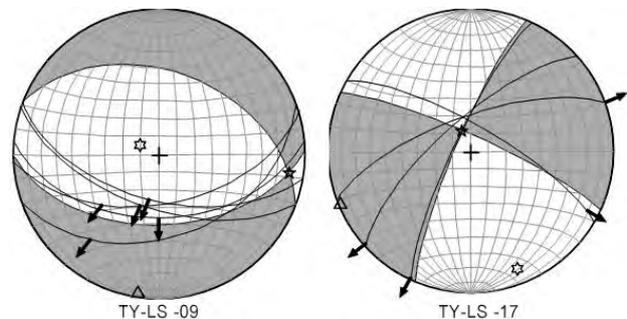
with the NE-SW direction, 10 compression stress states with the NW-SE direction; 02 compression stress states caused tectonic inversion of the fault in the E-W direction, 01 compression stress state caused tectonic inversion of the fault with the NE-SW direction, 01 compression stress state caused tectonic inversion of the fault with the NW-SE direction and 02 compression stress states caused tectonic inversion of the fault with the N-S direction; 14 extension stress states: 02 with the E-W direction and 02 with the N-S direction; 06 with the NE-SW direction and 04 with the NW-SE direction.



**Fig. 3.** Normal fault with the orientation 320/65 at survey location TY-LS-07. The analytical result determined the stress state: Sigma 1: 141/70; Sigma 2: 050/01; Sigma 3: 319/20.



**Fig. 4.** The normal left fault with orientation 065/80 and striation pitch angle 250 at the survey location TY-LS-13. The analytical result determined the stress state: Sigma 1: 290/24; Sigma 2: 134/63; Sigma 3: 024/09.



**Fig. 5.** The analytical result of striation on the fault surface at the survey location TY-LS-09 and TY-LS-17. The stress state determined as Sigma 1: 294/78; Sigma 2: 098/12; Sigma 3: 189/03 for TY-LS-09 and Sigma 1: 147/14; Sigma 2: 337/78; Sigma 3: 247/02 for TY-LS-17.

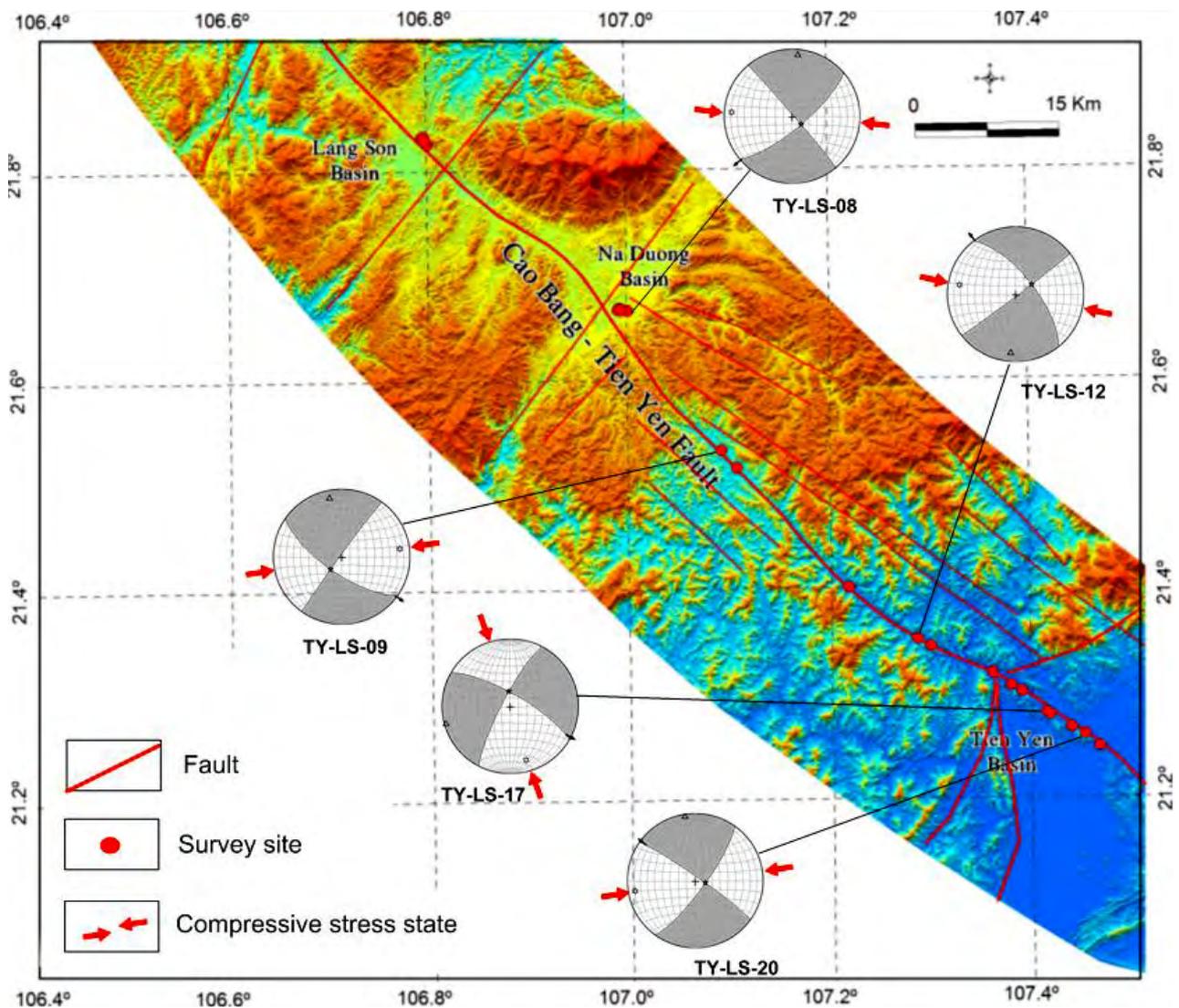
**Compression stress state in the N-S and E-W direction**

The statistical data have indicated that 04 survey locations which have a compression stress state with the E-W direction caused the left lateral strike-slip of the NW-SE fault at survey

locations TY-LS-09, TY-LS-12, TY-LS-20; the right lateral strike-slip of the NE-SW fault at the survey location CB-TY-08 and the compression stress state with the N-S direction caused the right lateral strike-slip of the NW-SE fault at the survey location TY-LS-17 (Tab. 2; Fig. 6).

**Table 2. Compression stress state in the E-W and N-S direction caused the left and right lateral strike-slip of the NW-SE and NE-SW fault**

No	Survey location index	Orientation	Fault description	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
1	TY-LS-08	140/75	Right lateral strike-slip	274/12	133/75	006/09
2	TY-LS-09	215/70	Left lateral strike-slip	082/16	220/70	349/13
3	TY-LS-12	052/68	Left lateral strike-slip	280/17	058/68	185/14
4	TY-LS-17	030/75	Right-lateral/normal, pitch = 10°	163/18	356/72	254/04
5	TY-LS-20	035/85	Left-lateral/normal, pitch = 12°	260/12	103/77	351/04



**Fig. 6. Map of compression stress state in the E-W and N-S direction along CB-TY fault zone, TY-LS section.**

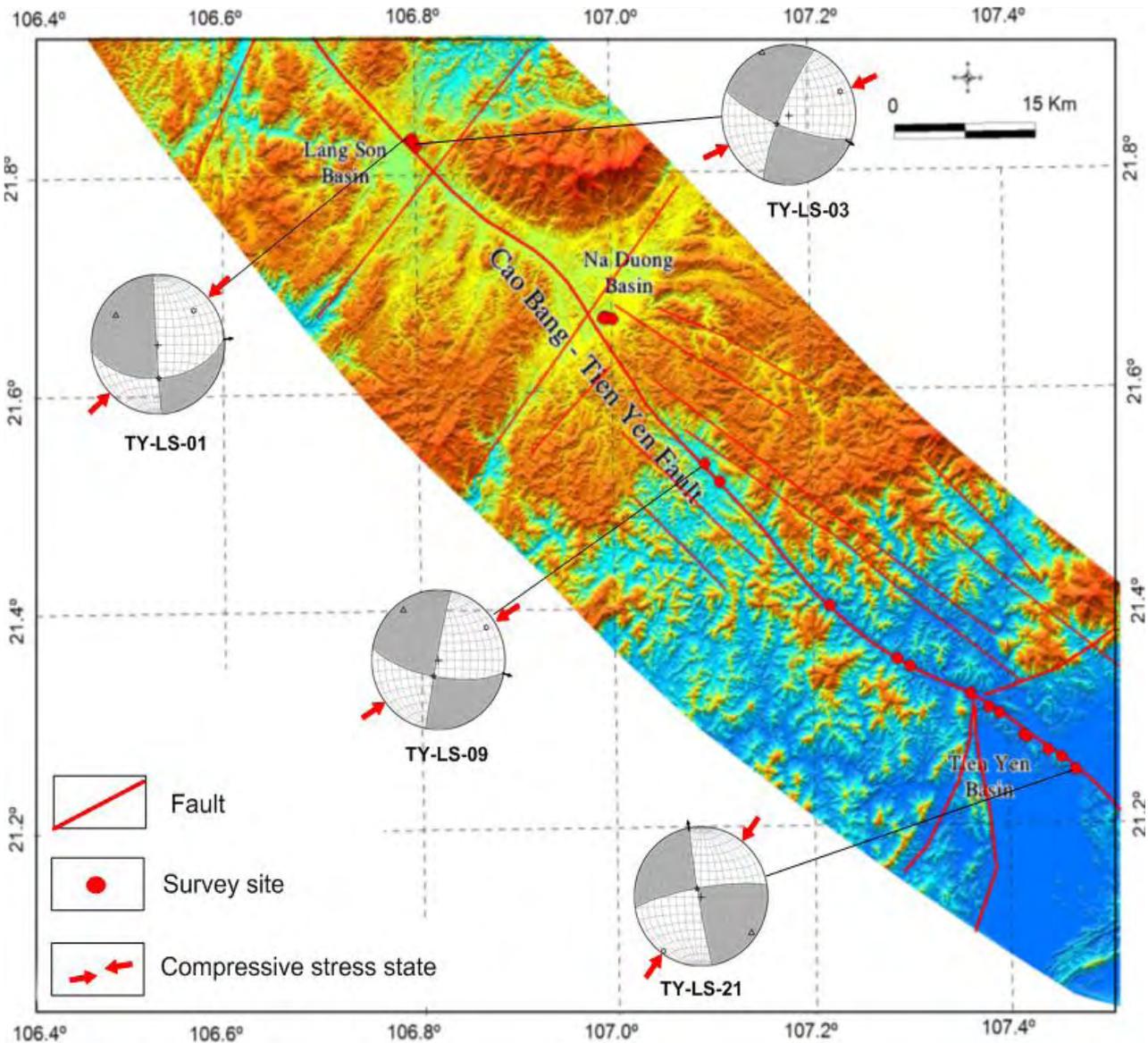
**Compression stress state in the NE-SW direction**

Similarly, the statistical data also has indicated that 04 survey locations have compression stress state in the NE-SW direction,

caused the left lateral strike-slip of the E-W fault at the survey locations TY-LS-01, TY-LS-03, TY-LS-09 and right lateral strike-slip of the N-S fault at the survey location TY-LS-21 (Tab. 3; Fig. 7).

**Table 3. Compression stress state in the NE-SW direction caused the left lateral strike-slip of E-W fault and the right lateral strike-slip of the N-S fault**

No	Survey location index	Orientation	Fault description	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
1	TY-LS-01	175/50	Left lateral strike-slip	048/29	178/50	303/25
2	TY-LS-03	200/75	Right-lateral/normal, pitch = 10°	067/17	234/72	336/04
3	TY-LS-09	190/70	Left lateral strike-slip	057/16	195/70	324/12
4	TY-LS-21	260/87	Right-lateral/normal, pitch = 10°	036/10	188/80	305/04



**Fig. 7.** Map of compression stress state in the NE-SW direction along CB-TY fault zone, TY-LS section.

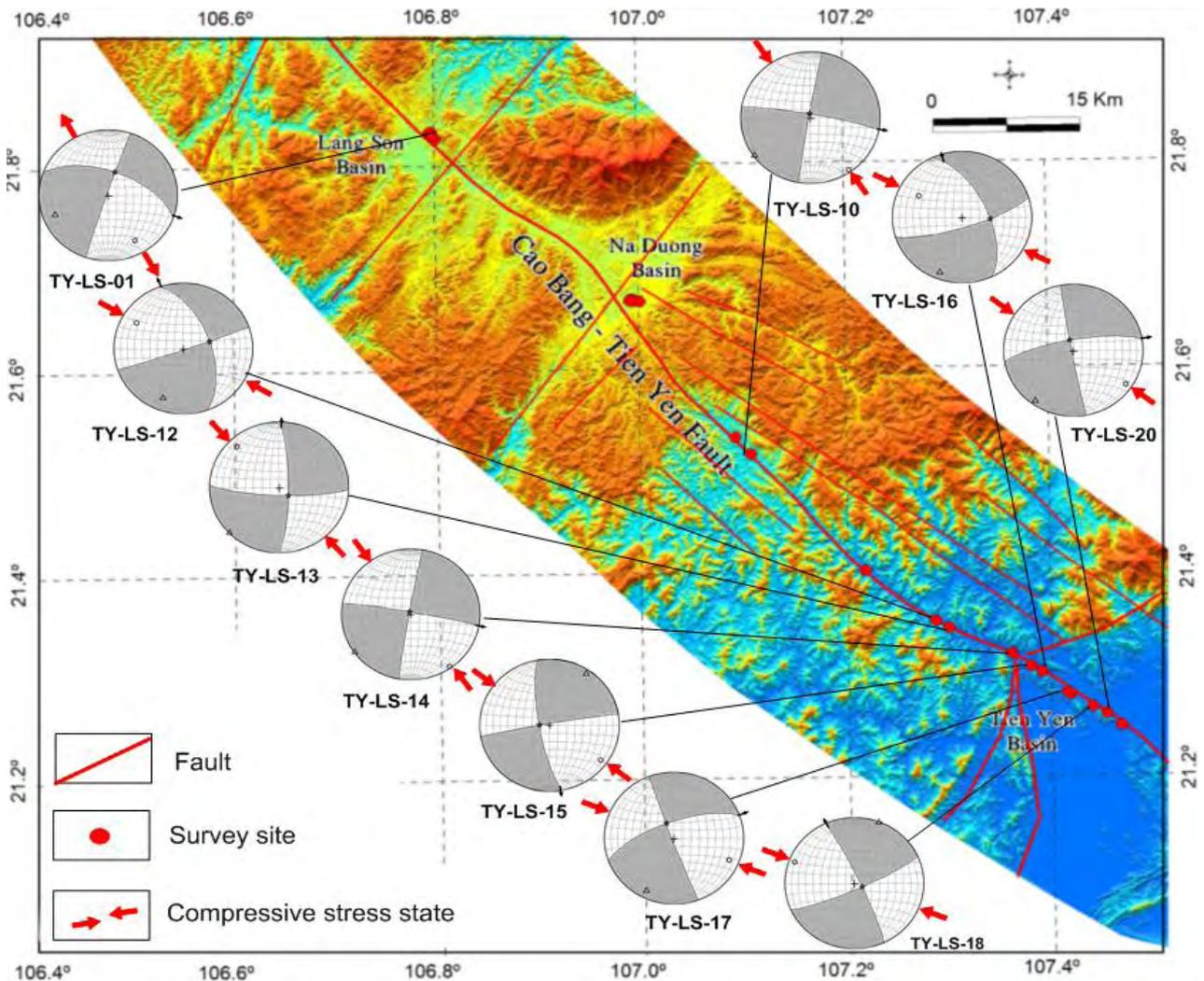
**Compression stress state in the NW-SE direction**

The statistical data also indicated that 10 survey locations have compression stress state in the NW-SE direction, caused the right lateral strike-slip of E-W fault at the survey locations

TY-LS-01, TY-LS-10, TY-LS-14, TY-LS-17, TY-LS-20; the left-lateral strike-slip of sub-longitude fault at the survey locations TY-LS-12, TY-LS-16, TY-LS-18 and left lateral strike-slip of N-S fault at the survey locations TY-LS-13, TY-LS-15 (Tab. 4; Fig. 8).

**Table 4. Compression stress state in the NW-SE direction caused the left and right lateral strike-slip of E-W fault, sub-longitude fault and N-S fault**

No	Survey location index	Orientation	Fault description	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
1	TY-LS-01	020/60	Right lateral strike-slip	151/20	024/60	250/22
2	TY-LS-10	010/85	Right lateral strike-slip	144/04	350/84	235/03
3	TY-LS-12	070/58	Left lateral strike-slip	301/22	074/58	201/21
4	TY-LS-13	090/79	Right-lateral/normal, pitch = 10°	316/15	132/75	226/01
5	TY-LS-14	010/87	Right lateral strike-slip	145/04	337/86	235/02
6	TY-LS-15	260/78	Right-lateral/normal, pitch = 35°	126/10	268/78	035/07
7	TY-LS-16	065/60	Left-lateral/normal, pitch = 15°	298/31	092/57	201/12
8	TY-LS-17	340/70	Right lateral strike-slip	113/16	334/70	206/12
9	TY-LS-18	075/84	Left-lateral/normal, pitch = 8°	290/10	118/80	021/02
10	TY-LS-20	350/77	Right lateral strike-slip	124/11	342/77	216/07



**Fig. 8. Map of compression stress state in the NW-SE direction along CB-TY fault zone, TY-LS section.**

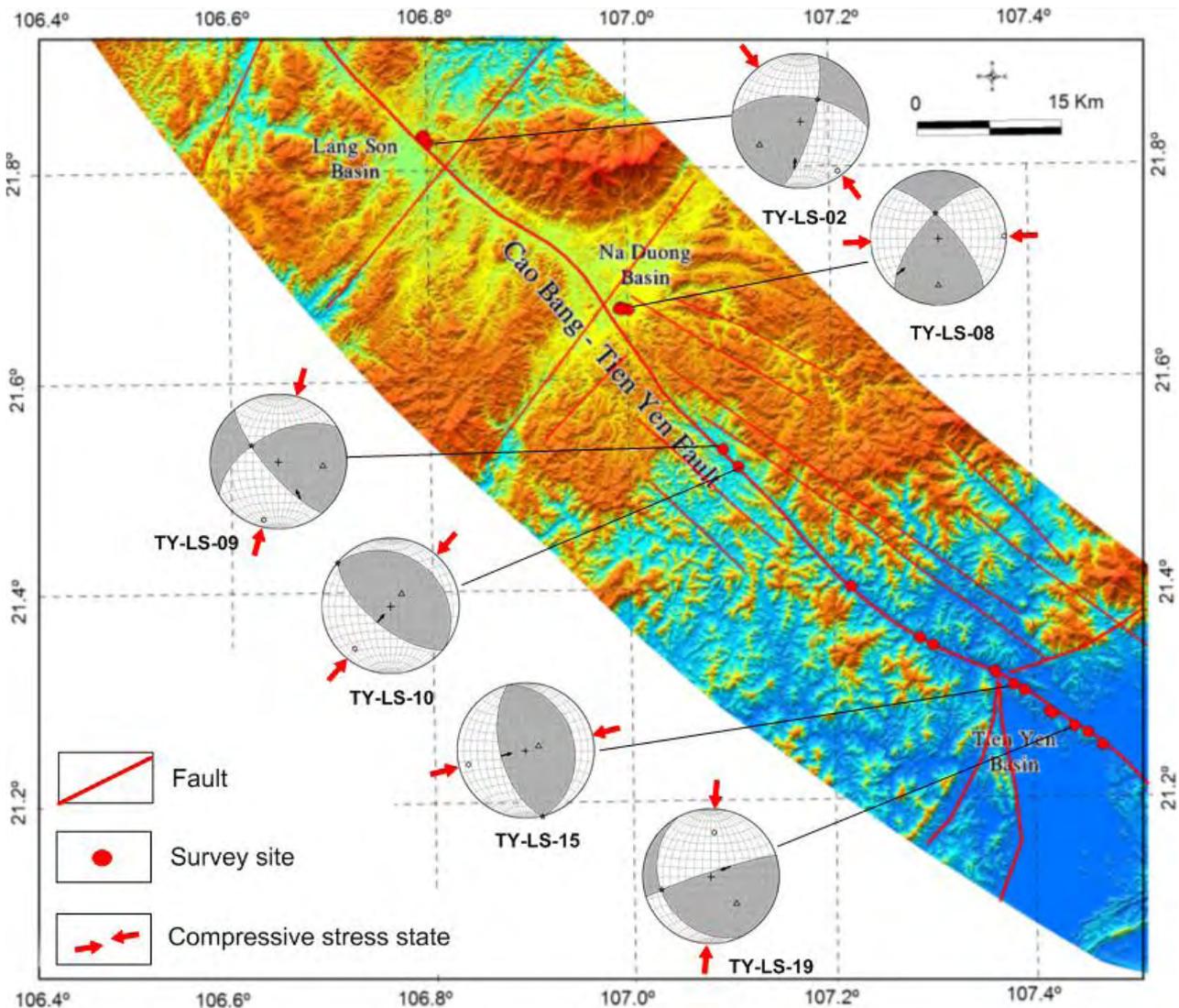
**Compression stress state in the E-W, N-S, NE-SW and NW-SE direction**

The statistical data also indicated that compression stress state in the E-W and NE-SW direction caused the inversion of N-S fault and NE-SW at the survey locations TY-LS-08, TY-LS-15; the compression stress state in the N-S direction caused the inver-

sion of the NW-SE and sub-latitude fault at the survey locations TY-LS-09, TY-LS-19; the compression stress state in the NE-SW direction caused the inversion of the NW-SE fault at the survey location TY-LS-10; the compression stress state in the NW-SE direction caused the inversion of NE-SW fault at the survey location TY-LS-02 (Tab. 5; Fig. 9).

**Table 5. Compression stress state in the E-W, N-S, NE-SW and NW-SE direction caused the inversion of the N-S, E-W, NW-SE and NE-SW fault**

No	Survey location index	Orientation	Fault description	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
1	TY-LS-02	105/75	Left-lateral/reverse, pitch = 30°	142/09	038/57	239/32
2	TY-LS-08	310/67	Right-lateral/reverse, pitch = 20°	088/03	353/60	180/30
3	TY-LS-09	230/75	Right-lateral/reverse pitch = 35°	194/12	300/52	095/35
4	TY-LS-10	220/65	Thrust	219/20	310/10	041/70
5	TY-LS-15	255/60	Thrust	256/15	166/02	072/75
6	TY-LS-19	342/85	Left-lateral/reverse, pitch = 65°	003/34	254/24	137/44



**Fig. 9.** Map of compression stress state in the E-W, N-S, NE-SW and NW-SE direction along CB-TY fault zone, TY-LS section.

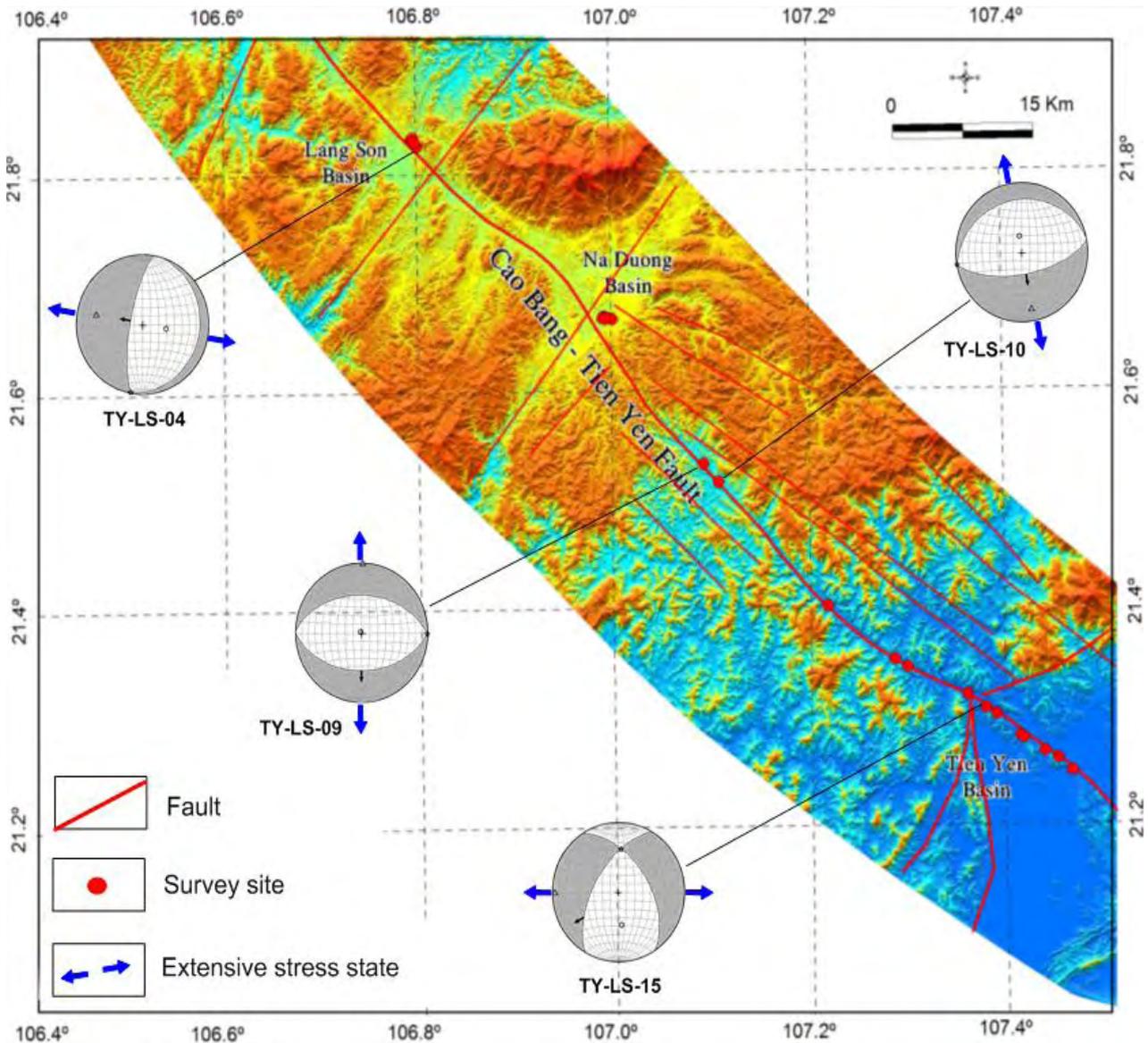
**Extension stress state in the E-W and N-S direction**

The statistical data determined the extension stress state in the N-S direction formed normal faults in the E-W direction at the survey loca-

tions TY-LS-09, TY-LS-10; the extension stress state in the E-W direction formed a normal fault in the N-S direction at the survey locations TY-LS-04, TY-LS-15 (Tab. 6; Fig. 10).

**Table 6. Extension stress state in the E-W and N-S direction formed normal faults in the N-S and E-W direction**

No	Survey location index	Orientation	Fault description	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
1	TY-LS-04	280/75	Normal	100/60	010/01	279/29
2	TY-LS-09	180/45	Normal	270/89	090/01	000/1
3	TY-LS-10	170/64	Normal	352/71	259/01	169/18
4	TY-LS-15	300/60	Left-lateral/normal, pitch = 45°	174/52	003/37	270/05



**Fig. 10.** Map of extension stress state in the E-W and N-S direction along CB-TY fault zone, TY-LS section.

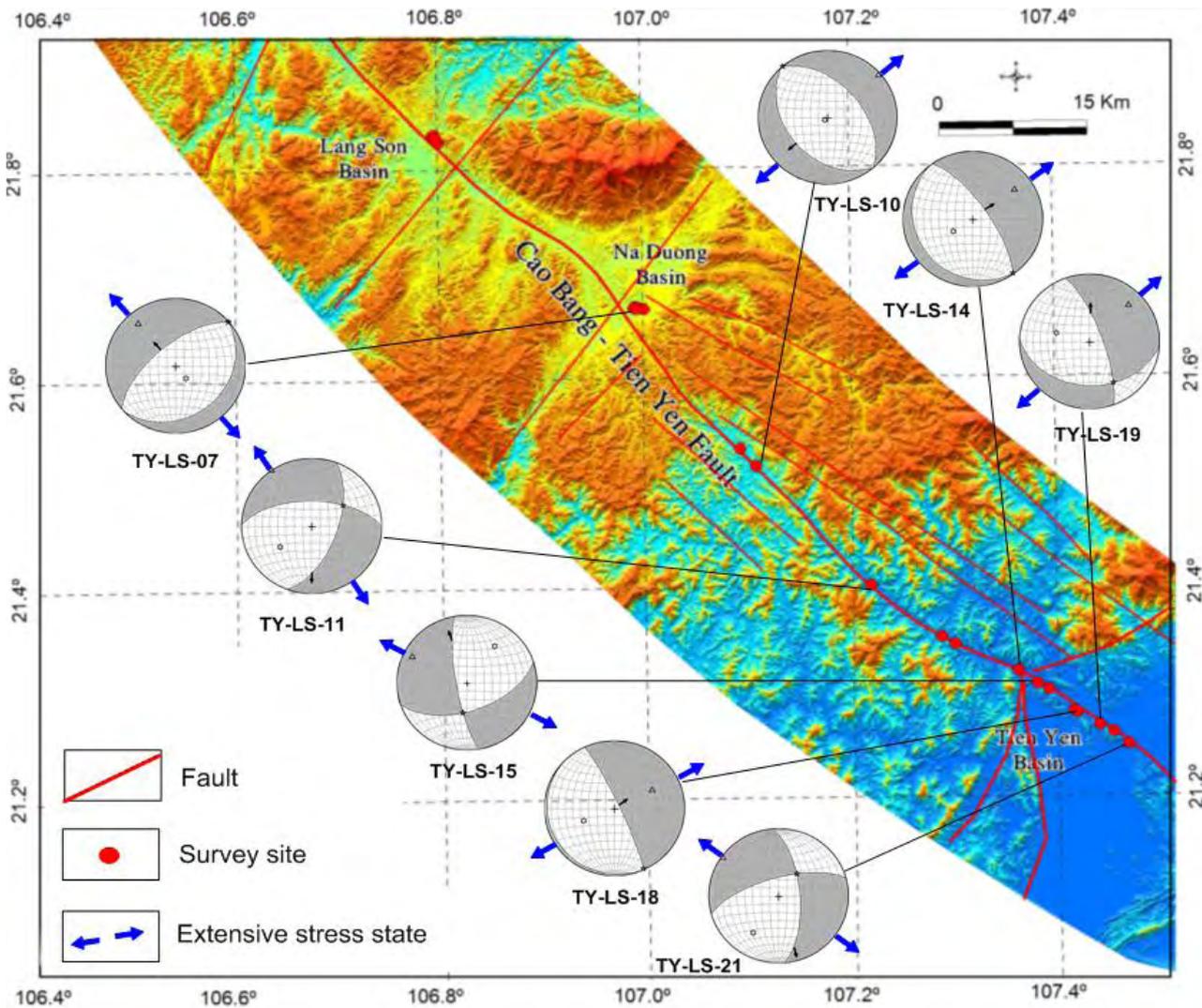
**Extension stress state in the NE-SW and NW-SE direction**

The statistical data determined the extension stress state in the NE-SW direction formed the normal fault in the NW-SE direction at the survey

locations TY-LS-10, TY-LS-14, TY-LS-18, TY-LS-19; the extension stress state in the NW-SE direction formed the normal fault in the NE-SW direction at the survey locations TY-LS-07, TY-LS-11, TY-LS-15, TY-LS-21 (Tab. 7; Fig. 11).

**Table 7. Extension stress state in the NE-SW and NW-SE direction formed a normal fault in the NW-SE and NE-SW direction**

No	Survey location index	Orientation	Fault description	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
1	TY-LS-07	320/65	Normal	141/70	050/01	319/20
2	TY-LS-10	230/40	Normal	223/85	319/01	050/50
3	TY-LS-11	110/60	Right-lateral/normal, pitch = 35°	235/41	055/45	325/01
4	TY-LS-14	055/72	Normal	238/63	144/02	054/27
5	TY-LS-15	260/78	Left lateral strike-slip	036/32	187/54	297/14
6	TY-LS-18	075/84	Left-lateral/normal, pitch = 8°	246/51	155/02	064/39
7	TY-LS-19	070/75	Left-lateral/normal, pitch = 58°	285/50	150/31	046/23
8	TY-LS-21	085/65	Right-lateral/normal, pitch = 24°	215/34	037/56	306/02



**Fig. 11.** Extension stress state in the NE-SW and NW-SE direction along CB-TY fault zone, TY-LS section.

### **Thermal springs**

The most ancient carbonate formations are located in the northern Vietnam (Proterozoic – lower Cambrian). However, the main carbonate rocks in the region were created in middle Cambrian, Ordovician, Devon and Triassic. Capacity of carbonate sediments is 3000 m [Drogue et al., 2000].

The region of the northern Vietnam is tectonic active, the main active strike-slip fault zone of Southeast Asia – the Red River rift is located here. Annually in this area about 400 earthquakes are registered [Drogue et al., 2000]. Tectonic motions along the main fault zones create conditions for strengthening of deep fluid streams and opening of the new channels, especially if the region is under the influence of strong neotectonic activity.

Average air temperature near the delta of the Red River is 22–26 °C and in mountains – 15–16 °C. Thermal waters in this research we define as water, with a temperature above, than average annual temperature value of water sources on surface. In a research it is accepted that waters with a temperature over 26 °C can be considered thermal.

Thermal springs in the northern provinces of Vietnam: Hoa Binh, Phu Tho, Son La, Dien Bien, Lai Chau, Lao Kai, Yen Bai, Hai Phong were sampled. Field work included sampling water with a Niskin system batometer from thermal and mineral springs into 0.5 l bottles. Gas was extracted by vacuum method.

Water temperature, pH, mineralization, flow rate of springs were measured. 10 ml of glass containers were sampled above the source surface for subsequent calculation of methane flow into the atmosphere.

In total, more than 60 water samples were sampled and analyzed. Study object choice was based on information obtained from joint Russian-Vietnamese studies in the area of northern Vietnam in 2015–2017.

Samples were analyzed for hydrocarbon gases, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, He, and H<sub>2</sub> (Certificate of the gasgeochemistry laboratory 1.047-18, Certificate of Rosstandart No. 41). Background gas concentrations of thermal water samples were: CH<sub>4</sub> – 164 nl/l, CO<sub>2</sub> – 21 %, ethane-butane in total – 0.34 ppm, He – 42 nl/l (3.9 ppm), H<sub>2</sub> – 30 nl/l

(1.8 ppm) (in seawater background helium content is 8.55 ppm, hydrogen – 4.5 ppm).

The most important result of the study was the establishment of a relationship between thermal spring regime, thermogenic gas component, and geological structure of northern Vietnam.

Increased concentrations of hydrogen (5900 nl/l), helium (up to 4252 nl/l), carbon dioxide (up to 72 %), methane (up to 137776 nl/l) were found in all thermal springs within the Red River rift, that indicates geodynamic activity in the field of research and possible delivery of deep fluid through ultra-deep permeable zones.

Studies were also carried out directly at within the fault Cao Bang – Tien Yen. Researches were on hot springs in the province BaVi (delta of the Red River). The springs located to the Hanoi most closely than other hot springs of Vietnam. Water was sampled also from wells and sources in the province Hoa Binh (Kim Boi) located in 64 km to the northwest from Hanoi. On surface water has temperature 36 °C. Around the source several small reservoirs with continuously gurgling gas bubbles are located. The mineral composition of water is highly competitive with the best world brands.

Thermal waters in the northwest are associated with the fault system of NW-SE direction: Song Da, Thuan Chau, Song Hong and Song Chay faults. The springs located in the Lao Cai province are in the granite Fan Si Pan massif.

Based on tectonic data and results of the chemical composition analysis of natural gases, it is possible to claim that gases of these sources have thermogene origin. Also increased content of helium and hydrogen speaks about activity of geological structures within which sources are located. All samples contain impurity of heavy hydrocarbon gases, generally propane and butane (Tab. 8).

In case of major earthquakes, seismotectonic activation there is an increase in helium content in the thermal spring water in reference to the background value for the region. Compared to the data obtained in the tectonically active area of the Red River rift, it can be argued that the increase in the level of helium and hydrogen in the thermal spring water is a response to seismic activity and indicates gas flow from deep sources.

Table 8. Distribution of natural gases in thermal sources of northern Vietnam by sampling results of 2016–2019

No	Place	T water, °C	CH <sub>4</sub> , nl/l	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , nl/l	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , nl/l	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , nl/l	O <sub>2</sub> +Ar, %	N <sub>2</sub> , %	CO <sub>2</sub> , %	He, nl/l	H <sub>2</sub> , nl/l	Flow, mkmol* m <sup>2</sup> /day
<b>2019</b>												
1	Hoa Binh	22.2	2153	4.3	55.9	0	4.9	48.5	42.2	52	5907	593
2	Hoa Binh	22.7	245	1	0	0	19.2	77.0	0.4	207	4077	
3	Kim Boi	35.6	84	2.2	199.7	0.28	8.5	80.1	6.4	78	1585	54
4	Kim Boi	35.6	930	3.7	211	1.72	9.2	74.5	12	34	1591	90
5	Hoa Binh city	24.4	786	1.8	0	0	15.3	63.0	18	1828	130	61
6	Phu Tho	24.9	2346	2.3	55	0.73	3.2	55.5	36.7	4253	92	197
7	Phu Tho	43.7	5042	1.2	244	0.56	7.2	75.7	12.6	140	2053	442
8	Phu Tho	22.8	218	3.2	60	0	2.9	40.7	51.5	30	718	16
9	Phu Tho	23.4	176	12.2	116.4	0	17	69.0	10.1	26	38	11
10	Phu Yen, Son La	41.5	2655	9.2	128.2	0.32	20	75.9	0.1	933	438	103
11	Son La	37.6	163	2.5	172.5	0.22	19.5	76.3	0.12	42	3.2	–
12	Dien Bien	22.1	915	1.6	90.5	0	20.1	75.9	0.01	–	–	–
13	Uba Hot Spring	84	137766	8.1	20099	12.75	20	75.6	0.01	726	29.4	22141
14	Lai Chau	34.2	1380	1.7	2000	1.47	7.3	69.3	17.8	106	2.1	11
15	Lao Cai	34.1	1839	1.8	645	0.51	7.2	66.2	21.9	152	62	59
16	Yen Bai	42	8576	1.5	271	0.34	7.3	62.0	25.8	2726	350	197
<b>2017</b>												
17	Sapa	21	96	1,09	0	0	19.4	75.7	0.38	84	58	–
18	Sapa	29	34	0,46	0	0	18.7	74.9	2.79	76	45	–
19	Sapa	38	142	3,14	0	0	18.6	63.8	0.53	63	52	–
20	Sapa	23	9985	8,36	0	0	24.1	74.6	4.83	85	21	–
21	Sapa	37	1152	0,62	0	0	21.3	69.9	0.48	105	30	–
22	Sapa	32	94	0,49	0	0	25.2	68.9	2.48	114	60	–
<b>2016</b>												
23	BaVi	33	0,12	0	0	0,002	18.04	75.7	9.11	37	28	–
24	BaVi	32	1,15	0	0	0	5.85	40.4	58.2	376	32	–
25	KimBoi	36	0,21	0,01	0	0,001	30.1	71.9	0.51	802	74	–
26	KimBoi	35	0,03	0	0	0,002	26.6	62.9	0.09	70	23	–
27	KimBoi	36	0,03	0	0	0,002	24.8	62.3	2.53	125	31	–
28	KimBoi	34	0,04	–	0	0	11.8	42.3	45.7	91	28	–

Note. The analysis is made by N.S. Syrбу, D.A. Shvalov. «–» gas component is not detected or its content is below the device detection limit (for heavy hydrocarbons – 10<sup>-5</sup>).

The increased content of methane to 9985 nl/l is found in springs in the northwest near Sapa at the height from 1000 to 1300 m. The maximum concentration of methane is found in Dien Bien province located in the Dien Bien-Lai Chau active fault impact zone (up to 137766 nl/l).

The researches of thermal springs are of great importance in aspect of search of oil and gas, genesis identification of natural gases. Thermal springs of northern Vietnam need further detailed studying. However, because of hard to reach most of them, further expeditions need thorough training, the help and assistance of the Vietnamese side.

**Discussions**

The analytical results of 59 striations on the fault surface at 21 survey locations along CB-TY fault zone, TY-LS section determined the stress states which caused the strike-lip, inversion and extension of the faults with E-W, N-S, NE-SW and NW-SE direction. The summarized information in detail of stress state and their movement is recorded in Table 9.

The statistic results of stress state in the Table 8 showed that, the number of survey locations caused the compression stress state with

the strike-slip fault in the NW-SE direction is maximum and reduce slowly under the E-W and NE-SW direction; the number of survey locations has extension stress state which caused the normal fault NW-SE and NE-SW direction is quite even, corresponding to the number of survey locations with the compression stress state in the NE-SW and NW-SE direction.

The presence of numerous survey locations caused the compression stress states in the E-W, N-S, NE-SW and NW-SE direction, reflecting the specific information of the tectonic activity phases. Each tectonic activity phase inside the Earth’s crust usually leaves the specific evidences. The combination of the other analytical results such as paleontology, stratigraphy, petrology, etc. will be the basis for determining the time, dividing the tectonic activity phase and re-building the tectonic evolution.

Some analytical results of previous studies suggested that within the CB-TY fault zone has two major periods of tectonic activity which occurred in the Cenozoic [Vu Van Chinh, 2002; Pubellier et al., 2003]. The first is the left lateral strike-slip fault in the NW-SE direction (Red River fault zone and CB-TY fault zone) within the Oligocene-Late Miocene period, due to the impact

*Table 9. Summary of stress state at survey locations along CB-TY fault zone, TY-LS section*

No	Stress state direction	Survey location index	Fault description
1	E-W	TY-LS-09, 12, 20 TY-LS-08	Left lateral strike-slip of the NW-SE Left lateral strike-slip of the NE-SW
2	N-S	TY-LS-17	Right lateral strike-slip of the NW-SE
3	NE-SW	TY-LS-01, 03, 09 TY-LS-21	Left lateral strike-slip of the E-W Right lateral strike-slip of the N-S
4	NW-SE	TY-LS-01, 10, 14, 17, 20 TY-LS-12, 16, 18 TY-LS-13, 15	Right lateral strike-slip of the E-W Left lateral strike-slip of the NW-SE Left lateral strike-slip of the N-S
5	E-W	TY-LS-08 TY-LS-15	Left-lateral/reverse of the NE-SW fault Reverse of the N-S fault
6	N-S	TY-LS-09	Left-lateral/reverse of the NW-SE fault
7	NE-SW	TY-LS-10	Reverse of the NW-SE fault
8	NW-SE	TY-LS-02	Right-lateral/reverse of the NE-SW fault
9	N-S	TY-LS-09, 10	Normal of the E-W
10	E-W	TY-LS-04, 15	Normal of the N-S
11	NE-SW	TY-LS-10, 14, 18, 19	Normal of the NW-SE
12	NW-SE	TY-LS-07, 11, 15, 21	Normal of the NE-SW

of the compression stress state in the E-W direction [Vu Van Chinh, 2002; Pubellier et al., 2003; Nguyen Quoc Cuong et al., 2013; Kasatkin et al., 2014] and the right lateral strike-slip fault in the NW-SE direction, due to impact of the compression stress state in the N-S direction [Lacassin et al., 1994; Vu Van Chinh, 2002; Pubellier et al., 2003; Phan Trong Trinh et al., 2012; Zuchiewicz et al., 2013; Nguyen Quoc Cuong et al., 2013; Kasatkin et al., 2014; Michael, Phung Van Phach, 2015].

In order to analyze and determine the stress state of the tectonic activity phases at the survey locations and the separation of these phases is based on geological events such as the formation of sedimentary basins along the CB-TY fault zone and other tectonic activities in the vicinity of the northern Red River basin which are located in the southern part of the CB-TY fault zone (Fig. 12).

If we consider the compression stress state with the E-W direction occurred in the Oligocene-Miocene period, caused the left lateral strike-slip of the NW-SE fault [Vu Van Chinh, 2002] and the formation of the Cao Bang pull-apart basin which are deposited by Cenozoic sediments, the extension of the NE-SW direction in Na Duong sedimentary basin at the survey location CB-TY-07 may be also considered as the coincidence of the compression stress state in the NE-NW direction in the northern part of Red River sedimentary basin, caused the tectonic inversion here during the Mid-Late Miocene [Nguyen Giang Vu, 2003]. Next, it is the compression stress

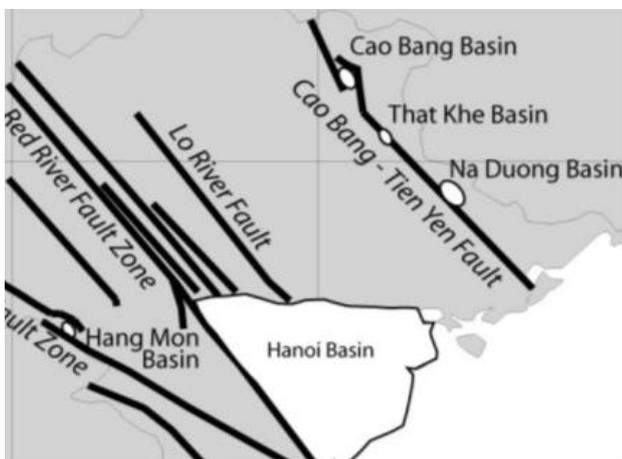


Fig. 12. Major fault systems in the northern part, Vietnam [Böhme et al., 2011].

state in the N-S direction caused the right lateral strike-slip of the NW-SE fault zone during Pliocene-present [Lacassin et al., 1994; Vu Van Chinh, 2002; Pubellier et al., 2003; Phan Trong Trinh et al., 2012; Zuchiewicz et al., 2013; Nguyen Quoc Cuong et al., 2013; Kasatkin et al., 2014; Michael, Phung Van Phach, 2015]. The compression stress state caused the right lateral strike-slip with the numerous of the NW-SE direction at the survey locations along CB-TY fault zone, LS-TY section within study area can occur before the Cenozoic period of three compression directions above, such as: E-W, NE-SW and N-S. Because the striations measured on the fault surface are mostly presence in Triassic and Jurassic age and it did not see in younger rocks at the survey locations along the fault zone (Fig. 2; Tab. 1). The fracture orientation in this direction at some survey locations along the fault zone is shown in Figure 13.

Besides, the analytical results of fracture orientation at the survey locations in the sedimentary rocks O-S of the Coto formation, on the Coto-Thanhlan islands which are located in the southeastern part of the CB-TY fault zone also indicates that they have main direction NW-SE.

With the analytical results above, tectonic activity phases along CB-TY fault zone, TY-LS section can be divided into the phases, corresponding to the tectonic activity stages, follow in order of: 1) NW-SE; 2) E-W; 3) NE-SW and 4) N-S.

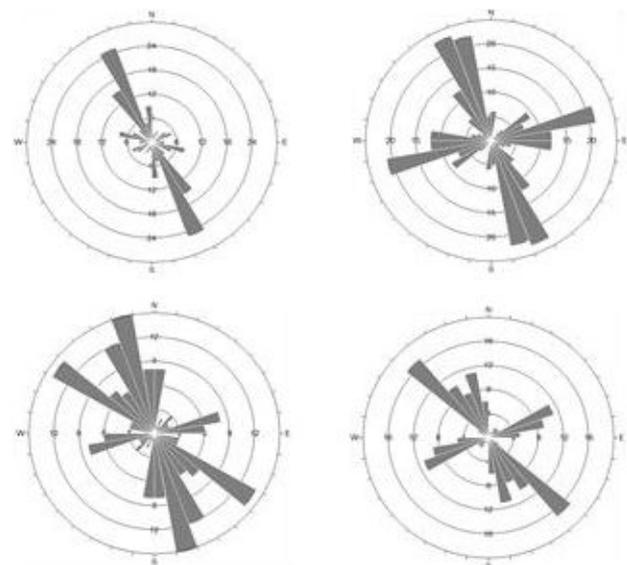


Fig. 13. Fracture orientation contour in the NW-SE, NE-SW and E-W direction measured in the sediment of Triassic and Jurassic age.

## Conclusions

The analytical results of 59 striations on the fault surface at 21 survey locations along the CB-TY fault zone, TY-LS section, about 100 km long determined the strike-slip fault with the compression stress state of the E-W, NE-SW, NW-SE and N-S direction; the compression stress state of the E-W, N-S, NE-SW and NW-SE direction caused the inversion of the N-S, E-W, NW-SE and NE-SW fault; the extension stress state of the E-W, N-S, NE-SW and NW-SE direction caused normal slip of the N-S, E-W, NW-SE and NE-SW fault. The statistical results have indicated that there are 05 compression stress states in the E-W direction, 04 compression stress states in the NE-SW direction, 10 compression stress states of the NW-SE direction; 06 compression stress states caused the tectonic inversion of 02 the E-W direction, 01 compression stress states in the NE-SW direction, 01 compression stress states in the NW-SE direction and 02 compression stress states in the N-S direction; 14 extension stress states, with 02 in the E-W direction, 02 in the N-S direction, 06 in the NE-SW direction and 04 in the NW-SE direction.

The analytical results and data from the field survey together the comparison of previous studies, this study area indicated that there are four the main tectonic phases which are arranged in the order: 1) NW-SE; 2) E-W; 3) NE-SW and 4) N-S. In particular, the first compression phase NW-SE severely destroyed the old rocks, Jurassic age and earlier, found at most of the survey locations along the CB-TY fault zone, TY-LS section will occur before the Cenozoic and Jurassic period; the second compression phase E-W occurred during the Cenozoic period, caused the left displacement of the Red River fault zone in the Oligocene-Miocene period and the left displacement along the CB-TY fault zone formed the Neogen sedimentary basins: Cao Bang, That Khe, Lang Son, Na Duong; the third compression phase NE-SW occurred during the Mid-Late Miocene, caused the tectonic inversion of NW-SW fault in the northern part of the Red River sedimentary basin which are located in the southeast of the CB-TY fault zone; the final compression phase N-S occurred during the Pliocene-Quaternary period, caused the right

motion along the CB-TY fault zone and the Red River fault zone.

The major factors defining vertical or sub-vertical migration of gas components of the non-microbial nature are: tectonic faults, structures of extrusion, anticlinal folds complicated by disjunctive dislocation and shifts of geological structures.

The northern Vietnam is seismically active. Displacements along the main fault zones contribute to increased permeability, facilitate the advance of heat and thermogenic gases to the surface.

Thermal waters in the northwest Vietnam are associated with active fault zones. The seismotectonic activity of the region influences on their mode and gas chemical composition. Gases of the studied thermal springs have thermogenic origin.

## Acknowledgements

*This research is supported by the Project of "Research on the application of Block Theory to assess the risk of slope failure along the highway. Case study from km 0 to km 80 on the 3B highway", Code: TNMT.2018.03.18 of Ministry of Natural Resources and Environment, within the time 2018–2020.*

*The paper is financially supported by the Project of Vietnam Academy of Science and Technology (Code: VAST05.02/15-16), and partially by VAST and FEB RAS Gasgeochemical fields and CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> fluxes in the Northern and Central Vietnam and its shelf: study of lithosphere, hydrosphere and atmosphere interaction (Code: VAST18-006 / QTRU02.01/18-19).*

*The research is supported by the RFBR (20-35-70014) "Interrelation of geosogeochemical fields, tectonics, geodynamic situation and oil and gas bearing potential, which determine geologic and hydrocarbon potential of the North Vietnam".*

## References

1. Böhme M., Prieto J., Schneider S., Nguyen Viet Hung, Do Duc Quang, Dang Ngoc Tran. **2011**. The Cenozoic on-shore basins of Northern Vietnam: Biostratigraphy, vertebrate and invertebrate faunas. *Journal of Asian Earth Sciences*. 40(2): 672–687. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2010.11.002>
2. Böhme M., Aiglstorfer M., Antoine Pierre-Olivier, Appel E., Havlik Ph., Metais G., Laq The Phuc, Schneider S., Setzer F., Tapper R., Dang Ngoc Tran, Uhl D., Prieto J. **2013**. Na Duong (northern Vietnam) – an exceptional window into Eocene ecosystems from Southeast Asia. *Zitteliana*. A 53: 120–167
3. Drogue C., Cat N.N., Dazy J. **2000**. Geological factors affecting the chemical characteristics of the thermal

waters of the carbonate karstified aquifers of Northern Vietnam. *Hydrology and Earth System Sciences*. 4(2): 332–340. <https://doi.org/10.5194/hess-4-332-2000>

4. Huchon P., Le Pishon X., Rangin C. **1994**. Indochina Peninsula and the collision of India and Eurasia. *Geology*. 22(1): 27–30. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0027:ipatco>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0027:ipatco>2.3.co;2)

5. Kasatkin S.A., Golozubov V.V., Phung Van Phach, Le Duc Anh. **2014**. Evidences of Cenozoic strike-slip dislocations of the Red River Fault System in Paleozoic Carbonate Strata of Cat Ba Island (Northern Vietnam). *Russian Journal of Pacific Geology*. 8(3): 163–176

6. Lacassin P., Tapponnier H., Leloup Ph., Phan Trong Trinh, Nguyen Trong Yem. **1994**. Morphotectonic evidence for active movement along the Red River Fault System. In: *Proceed. Inter. Seis. Haz. South. Asia*, p. 66–71.

7. Le Trieu Viet. **2004**. Structural characteristics and evolution history of Cenozoic basins along Cao Bang-Tien Yen Fault Zone. *Vietnam Journal of Earth Sciences*. 26: 633–641

8. Leloup P.H., Lacassin R., Tapponnier P., Schärer U., Dalai Z., Xiaohan L., Liangshang Z., Trinh P.T. **1995**. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*. 251(1–4): 3–84. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00070-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00070-4)

9. Marett R.E., Allmendinger R.W. **1990**. Kinematic analysis of fault-slip data. *Journal of Structural Geology*. 12: 973–986. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(90\)90093-e](https://doi.org/10.1016/0191-8141(90)90093-e)

10. Michael B.W.F., Phung Van Phach. **2015**. Late Neogene structural inversion around the northern Gulf of Tonkin, Vietnam: Effects from right-lateral displacement across the Red River fault zone. *Tectonics*. 34(2): 290–212. <https://doi.org/10.1002/2014TC003674>

11. Nguyen Giang Vu. **2003**. Structural evolution of the block 102 and 106 Song Hong basin-implication for hydrocarbon potential. In: *Proceedings of conference on “Vietnam petroleum institute: 25 years of development and achievements”*. p. 284–309. (In Vietnamese)

12. Nguyen Thac Cuong, Giang Cao Duy, Thang Tran Trong. **2005**. General evaluation of the geothermal potential in Vietnam and the prospect of development in the near future. In: *Proceedings World Geothermal Congress*. Antalya, Turkey

13. Nguyen Quoc Cuong, Tokarski A.K., S’wierczewska A., Zuchiewicz W.A., Yem Nguyen Trong. **2013**. Late Tertiary tectonics of the Red River Fault Zone: Structural evolution of sedimentary rocks. *Journal*

*of Geodynamics*. 69: 31–53. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.05.002>

14. Phan Dong Pha, Geptner A.R., Nguyen Xuan Huyen, Petrova V.V., Le Thi Nghing, Nguyen Minh Quang. **2011**. A new discovery of stromatolite fossil in sediments of the Rinh Chua formation, Na Duong basin, Lạng Sơn, Vietnam. *Vietnam Journal of Earth Sciences*. 33(1): 94–96. <https://doi.org/10.15625/0866-7187/33/1/282>

15. Phan Trong Trinh, Ngo Van Liem, Nguyen Van Huong, Hoang Quang Vinh, Bui Van Thom, Bui Thi Thao, Mai Thanh Tan, Nguyen Hoang. **2012**. Late Quaternary tectonics and seismotectonics along the Red River Fault System, North Vietnam. *Earth-Science Reviews*. 114(3–4): 224–235. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.008>

16. Pubellier M., Rangin C., Phach P.V., Que B.C., Hung D.T., Lung Sang C.L. **2003**. The Cao Bang-Tien Yen Fault: implications on the relationships between the Red River Fault and the south China Coastal Belt. *Advances in Natural Sciences*. 4(4): 347–361

17. Rangin C., Klein M., Roques D., Le Pishon X., Trong L.V. **1995**. The Red River Fault System in the Tonkin Gulf, Vietnam. *Tectonophysics*. 243(3–4): 209–222. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)00207-p](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)00207-p)

18. Sun Z., Zhou D., Zhong Z., Zeng Z., Wu S. **2003**. Experimental evidence for the dynamics of the formation of the Yinggehai basin, NW South China Sea. *Tectonophysics*. 372(1–2): 41–58. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(03\)00230-0](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(03)00230-0)

19. Tapponnier P., Peltzer G., Armijo R. **1986**. On the mechanics of the collision between India and Asia. *Geological Society of London, Special Publications*. 19(1): 113–157. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1986.019.01.07>

20. Tapponnier P., Lacassin R., Leloup P.H., Schärer U., Dalai Z., Xiaohan L., Liangshang Z., Jiayou Z. **1990**. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*. 343(6257): 431–437. <https://doi.org/10.1038/343431a0>

21. Vu Van Chinh. **2002**. Neotectonic development phases and mechanism of the Cao Bang-Tien Yen Fault. *Journal of Earth Sciences*. 22(3): 181–187. (In Vietnamese).

22. Wysocka A. **2009**. Sedimentary environments of the Neogene basins associated with the Cao Bang-Tien Yen Fault, NE Vietnam. *Acta Geologica Polonica*. 59: 45–69

23. Zuchiewicz W., Cuong Nguyen Quoc, Zasadni J., Yem Nguyen Trong. **2013**. Late Cenozoic tectonics of the Red River Fault System, Vietnam, in the light of geomorphic studies. *Journal of Geodynamics*. 69: 11–30. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2011.10.008>

#### About Authors

TRUONG THANH PHI, Dr, Lecturer, Department of Geology, Hanoi University of Natural Resources and Environment, Hanoi; SHAKIROV Renat Bellalovich (ORCID 0000-0003-1202-0351), Dr Sci. Geology and Mineralogy, Head of Laboratory of gasgeochemistry, deputy director, SYRBU Nadezhda Sergeevna (ORCID 0000-0002-1441-6133), Cand. Sci. Geology and Mineralogy, Researcher, Laboratory of gasgeochemistry – V.I. Il’ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Science (POI FEB RAS).

## Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2018 году

© 2019 Д. А. Сафонов\*<sup>1,2</sup>, Т. А. Фокина<sup>1</sup>, Н. С. Коваленко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

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

**Реферат.** Представлена краткая характеристика сейсмичности Приамурья, Приморья, Курило-Охотского и Сахалинского регионов в 2018 г. Показаны современные регистрационные возможности Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН), Южно-Сахалинск. Описаны наиболее сильные и ощущавшиеся жителями региона землетрясения. Приведены механизмы очагов наиболее сильных событий, сделаны предположения о природе их источника. Показано, что в сейсмическом отношении 2018 год для территории зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН можно считать относительно спокойным, без событий разрушительного и катастрофического уровня ( $M > 7.0$ ). Выделяется район северных Курильских островов, где сейсмическая активность в 2018 г. оказалась несколько выше средних значений последнего десятилетия.

**Ключевые слова:** землетрясения, сейсмичность, сейсмическая активность, механизм очага землетрясения, Приамурье, Приморье, Сахалин, Курило-Охотский регион.

Для цитирования: Сафонов Д.А., Фокина Т.А., Коваленко Н.С. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2018 году. *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 4. С. 364–376. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.364-376>

## Seismicity of the South Far East of Russia in 2018

Dmitry A. Safonov\*<sup>1,2</sup>, Tatjana A. Fokina<sup>1</sup>, Natalya S. Kovalenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sakhalin Branch of the Federal Research Center “United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences”, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

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

**Abstract.** The article contains a description of the seismicity of the Amur region, Primorye, Kuril-Okhotsk and Sakhalin regions in 2018. The paper shows the modern registration capabilities of the Sakhalin branch of the Federal Research Center United Geophysical Service RAS (SF FRC UGS RAS), Yuzhno-Sakhalinsk. We describe the strongest earthquakes most felt by the inhabitants of the region. The focal mechanisms of strong events are presented, and assumptions about the nature of their source are made. It is shown that seismicity in 2018 for the territory of the Sakhalin branch of the FRC UGS RAS was relatively calm, although somewhat more remarkable in comparison with the last decade. It differs only in the area of the northern Kuril Islands, where seismic activity in 2018 was higher than the long-term average level.

**Keywords:** earthquakes, seismicity, seismic activity, earthquake focal mechanism, Amur region, Primorye, Sakhalin, Kuril-Okhotsk region.

For citation: Safonov D.A., Fokina T.A., Kovalenko N.S. Seismicity of the South Far East of Russia in 2018. *Geosystems of Transition Zones*. 2019, vol. 3, no. 4, pp. 364–376. (In Russian) <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.364-376>

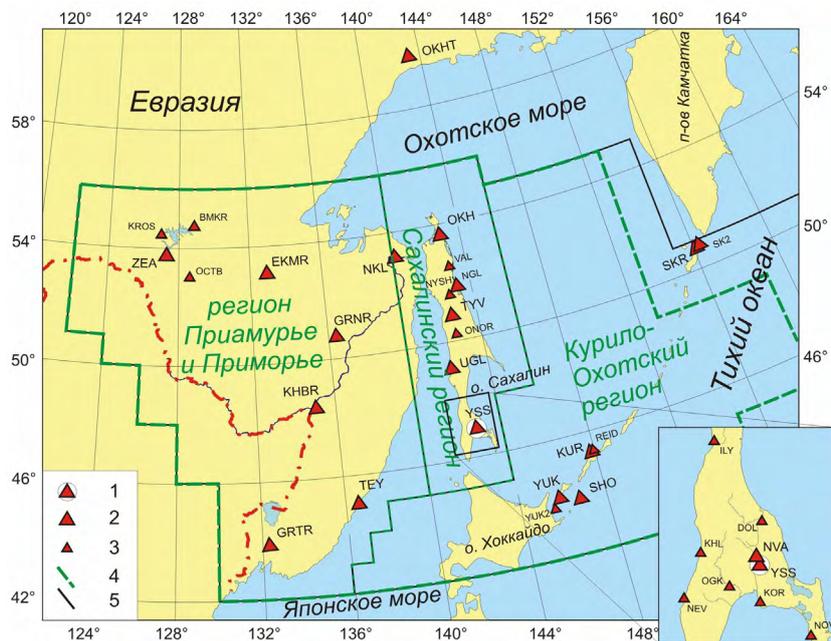
## Введение

На территории южной части Дальневосточного федерального округа в практике сейсмологических наблюдений [Габсатарова, 2007] традиционно выделяются три крупных региона: Курило-Охотский, включающий территорию Курильских островов, прилегающую часть Тихого океана, южную и центральную части охотоморской акватории, а также о. Хоккайдо и северную часть Японского моря; Сахалинский, включающий о. Сахалин и прилегающие акватории Охотского, Японского морей и Татарского пролива; регион Приамурье и Приморье, включающий Приморский и большую часть Хабаровского края, Амурскую и Еврейскую автономную области, а также приграничные районы Китая и прибрежную часть морей (рис. 1). Регистрация сейсмических событий естественного и техногенного характера в пределах этих трех регионов является задачей Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Южно-Сахалинск.

Текущая сейсмическая активность регионов обычно привлекает внимание специалистов в контексте сильных либо резонансных землетрясений, некоторым специалистам интересна общая картина, например, для прогнозных задач по потоку сейсмичности. Регулярный обзор сейсмичности зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН публикуется в сборниках «Землетрясения России...» (например, [Фокина и др., 2018]) с отставанием в 2 года и, более детально, в сборниках «Землетрясения Северной Евразии...» (например, [Фокина и др., 2017]) с отставанием в 6 лет. Результаты наблюдений на основе данных оперативных каталогов за год содержатся в непубликуемом ежегодном научном отчете СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Поэтому авторы решили представить обзор сейсмичности названных регионов за истекший год, который рассчитывают сделать регулярным. В работе показаны современные регистрационные возможности филиала, перечислены наиболее сильные и ощущавшиеся жителями региона землетрясения. Приведены механизмы очагов сильных событий, сделаны предположения о природе их источника.

Сводная обработка землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН проводится в два этапа. На первом составляется каталог землетрясений по оперативным данным (1–3 дня с момента события), на основе оперативного каталога формируется ежегодный отчет. На втором (в течение года) полученные результаты уточняются, дополняются, формируется окончательный каталог, публикуемый в вышеназванных сборниках. Зоны ответственности филиала по оперативным и окончательным данным несколько различаются: окончательную обработку каталога землетрясений северных Курильских



**Рис. 1.** Карта расположения стационарных сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН на 31 декабря 2018 г. 1 – информационно-вычислительный центр на станции «Южно-Сахалинск»; 2 – станции, оборудованные в качестве основного датчика широкополосными велосиметрами; 3 – станции, оборудованные в качестве основного датчика акселерометрами либо короткопериодными велосиметрами; 4 – зона ответственности СФ за данные окончательного каталога; 5 – зона ответственности СФ за данные оперативных наблюдений. На врезке – станция «Южно-Сахалинск» и выносные опорные пункты наблюдений южного Сахалина. Остальные усл. обозначения см. в тексте.

островов, входящих в зону оперативной обработки (в связи с территорией ответственности сейсмостанции «Южно-Сахалинск» по контролю цунамигенных землетрясений, а также необходимостью своевременного оперативного информирования о чрезвычайных ситуациях в пределах всей Сахалинской области), производит Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН. Границы зоны ответственности показаны на рис. 1.

В качестве основной энергетической характеристики землетрясений в практике СФ ФИЦ ЕГС РАН обычно применяется магнитуда  $M_{LH}$ , определяемая по соотношению  $A/T$  в максимальной фазе поверхностной волны на записях горизонтальных компонент сейсмографов (в случае современной цифровой аппаратуры применяется цифровая эмуляция). Однако число землетрясений, для которых она была непосредственно определена, невелико. Наиболее массовой энергетической характеристикой приамурских и приморских коровых землетрясений является энергетический класс Т.Г. Раутиан [1964]  $Kp$ , определяемый по соотношению  $A/T$  в максимальной фазе  $S$ -волн, записанных короткопериодной аппаратурой непосредственно либо в цифровой эмуляции. Для регионов Сахалинского и Курило-Охотского используется энергетический класс С.Л. Соловьева [Соловьев, Соловьева, 1967]  $Kc$ , как более отвечающий особенностям данных регионов. Для глубоких землетрясений (глубже 80 км) наиболее употребимой для регионов является магнитуда  $M_{SH}$  по горизонтальной компоненте волны  $S$  либо ее аналог для короткопериодной аппаратуры –  $M_{SHA}$ . Также в данной статье приводятся значения моментной магнитуды  $Mw$  для некоторых землетрясений, определенной в ходе расчета тензора сейсмического момента этих событий.

### **Сеть сейсмологических наблюдений СФ ФИЦ ЕГС РАН**

На 31 декабря 2018 г. сеть станций сейсмологических наблюдений в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН состояла из 45 пунктов инструментальных непрерывных наблюдений, из них 34 стационарных и 11 автономных полевых (локальная сеть на юге о. Сахалин).

На материковой части зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН (регион Приамурье и Приморье) расположено 10 стационарных пунктов наблюдений и один за границей этой зоны – сейсмостанция «Охотск» (ОКНТ) (рис. 1). Сейсмостанция «Кировский» (KROS) в 2018 г. не работала по техническим причинам.

На о. Сахалин расположено 16 стационарных наблюдательных пунктов, из них 12 автоматических, в том числе 8 выносных пунктов опорной станции «Южно-Сахалинск» (YSS) (рис. 1, врезка). Регистрируемые данные всех выносных пунктов обрабатываются в реальном времени на сейсмостанции «Южно-Сахалинск». Помимо этого на юге острова действует локальная сеть из 10 автономных полевых станций для детального наблюдения за сейсмичностью (комплект аналогичной аппаратуры есть и на станции «Южно-Сахалинск»), данные которой недоступны в режиме реального времени, их обрабатывают в СФ ФИЦ ЕГС РАН позднее по мере поступления [Семенова и др., 2018].

На Курильских островах находятся 7 стационарных наблюдательных пунктов, из них 4 автоматических.

Все пункты оборудованы цифровой аппаратурой. Общее число сейсмометров, установленных на стационарных наблюдательных пунктах, на конец 2018 г. – 60. Из них 25 – акселерометры, 22 – широкополосные велосиметры, 13 – короткопериодные велосиметры. В настоящее время сеть сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН включает в себя хорошо зарекомендовавшее себя оборудование известных фирм: Guralp Systems Limited (UK), G. Streckeisen AG (Switzerland), GeoSIG Ltd (Switzerland), Nakusan Corporation (Japan), Corporate Headquarters Kinematics Inc. (USA).

Кроме указанных выше пунктов наблюдений СФ ФИЦ ЕГС РАН, при сводной обработке сейсмологических данных или при решении задач Службы срочных донесений активно используются доступные в реальном времени данные 5 станций ДВО РАН и ФИЦ ЕГС РАН, расположенных на территории Приамурья и Приморья, а также данные 7 короткопериодных станций Хоккайдского университета (Япония), расположенных на о. Хоккайдо.

Текущая конфигурация сети сейсмических станций, с учетом установленного обобщения и привлечения в оперативном режиме данных станций соседних регионов, позволяет обеспечить на большей части зоны ответственности возможность регистрации как минимум тремя сейсмостанциями (что необходимо для корректного определения эпицентра) землетрясений начиная с представительной магнитуды  $M_n = 4.0$ . Исключение составляют центральная часть Охотского моря и район средних Курильских островов, где представительной можно считать магнитуду событий  $M_n = 4.5$ . Благодаря более плотной сети сейсмостанций, а также доступу к короткопериодным станциям Хоккайдского университета, на части Южных Курил и о. Хоккайдо порог уверенной регистрации составляет  $M_n = 3.5$ .

На территории о. Сахалин существующая сеть позволяет регистрировать без пропусков события с магнитудного порога  $M_n = 3.0$ , за исключением территорий полуостровов Крильон, Тонино-Анивского и Терпения, и с  $M_n = 3.5$  на указанных территориях и в прибрежных областях Охотского и Японского морей в границах Сахалинского региона.

На большей части региона Приамурье и Приморье сеть станций СФ ФИЦ ЕГС РАН с привлечением данных других филиалов и подразделений ФИЦ ЕГС РАН позволяет регистрировать без пропусков события начиная с магнитудного уровня  $M_n = 3.5$ . Уровень представительной регистрации землетрясений приграничных районов Китая в верхнем течении р. Амур и севера Хабаровского края несколько хуже, здесь представительной можно считать магнитуду  $M_n = 4.0$ . На юге Приморья и в районе Зейского водохранилища  $M_n = 3.0$ .

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

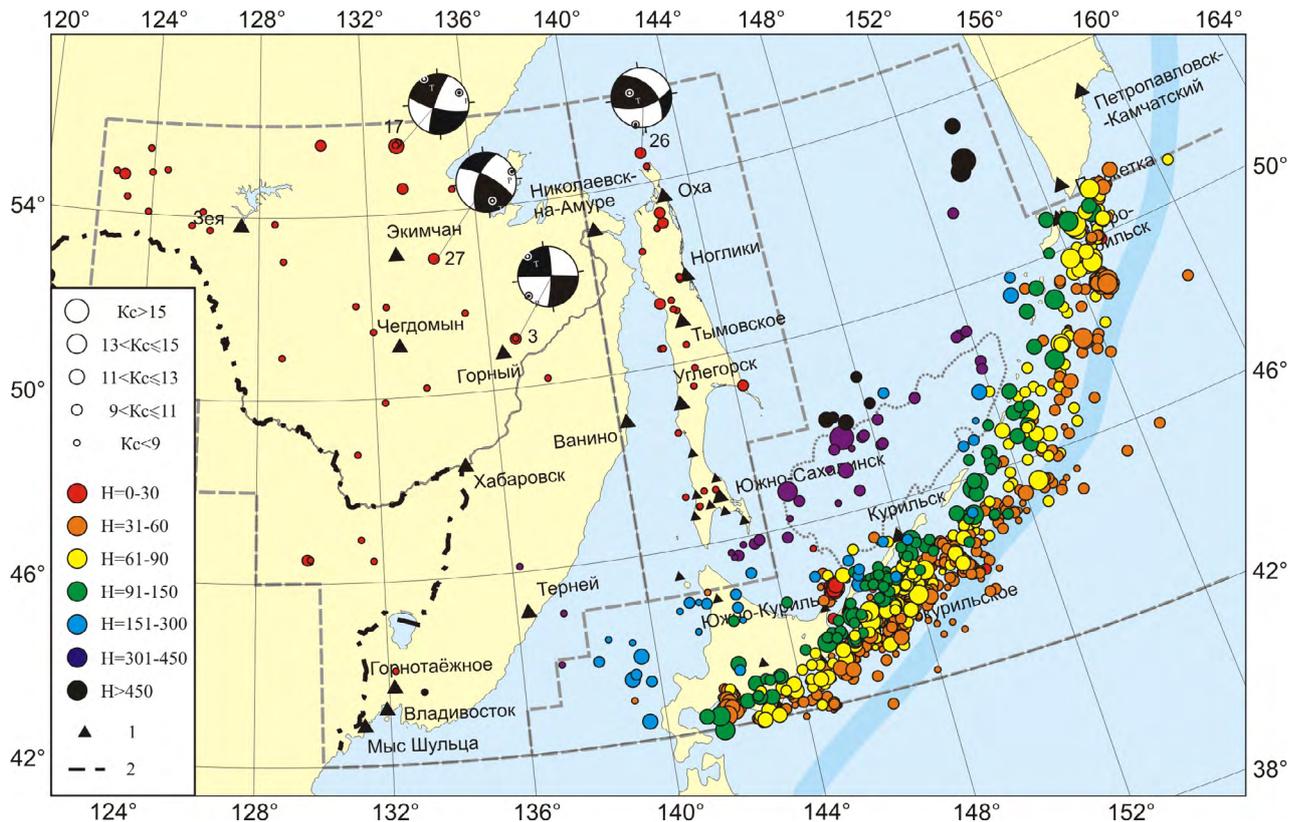
В оперативном каталоге землетрясений СФ ФИЦ ЕГС РАН за 2018 г. содержатся параметры 1112 землетрясений, из которых 1068 произошли в Курило-Охотском регионе,

32 – на Сахалине и его шельфе, 12 – в Приамурье и Приморье. Дополнительно к моменту написания статьи были определены параметры еще нескольких землетрясений представительной магнитуды ( $M \geq 2.6$ ) с эпицентрами в Приамурье и Приморье (предварительный каталог по итогам года), так что их общее количество равно 40. Карта эпицентров всех событий показана на рис. 2.

На территории Приамурья и Приморья в 2018 г. с учетом предварительного каталога определены параметры 40 землетрясений (рис. 2). В этом регионе наблюдается сейсмическая активность двух типов: мелкофокусная – с очагами землетрясений в земной коре (коровые землетрясения) и глубокофокусная – с глубиной очагов от 200 до 600 км с эпицентрами на территории Приморья и прибрежных акваториях Японского моря. Зарегистрировано 4 ощутимых\* землетрясения. Наиболее сильное коровое землетрясение зафиксировано 7 июля в 08:51 UTC в отрогах Атагского хребта (северная часть региона), магнитуда события  $M_w = 4.9$ ,  $K_r = 13.7$ . Землетрясение сопровождалось несколькими афтершоками с  $K_r \leq 9.1$ . Такого класса события в этом районе происходят редко. Данных об ощутимых проявлениях нет в связи с отсутствием вблизи эпицентра населенных пунктов. Помимо коровых событий было зарегистрировано 4 глубокофокусных землетрясения в диапазоне глубин  $H = 334–495$  км. Эпицентры 2 глубокофокусных землетрясений располагались на континентальной части Приморья, 2 – в Японском море вблизи пос. Терней. Самое сильное глубокофокусное землетрясение с  $M_{SHA} = 4.4$  и  $H = 495$  км произошло 24 января в 06:15 UTC севернее Владивостока.

Для Сахалинского региона 2018 год был сейсмически спокойным. Региональной сейсмической сетью были зарегистрированы и оперативно обработаны записи 32 коровых землетрясений, из которых 8 – ощутимые. Наиболее сильное коровое землетрясение произошло 12 сентября в 05:49 UTC в море к северу от п-ова Шмидта ( $K_c = 11$ ;

\*Ощутимыми считаются все сейсмические события, которые фактически ощущались людьми (обычно не менее 2 баллов), а информация об этом поступила в филиал ГС РАН.



**Рис. 2.** Карта эпицентров землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН за 2018 г.  $K_c$  – энергетический класс С.Л. Соловьева;  $H$  – глубина гипоцентра, км; 1 – сейсмическая станция; 2 – границы регионов. Показаны механизмы очагов некоторых землетрясений Приамурья и Сахалина (см. в тексте).

$H = 10$  км), в населенных пунктах событие не ощущалось. Помимо коровых зарегистрировано 7 глубокофокусных землетрясений в диапазоне глубин  $H = 275–326$  км в южной части региона, относящихся к Курило-Камчатской сейсмофокальной зоне.

На территории Курило-Охотского региона по оперативным данным зарегистрировано 1068 землетрясений, из них 61 ощутимое (рис. 3).

В течение года отмечены 4 сейсмические активизации с большим числом событий.

В августе в районе Южных Курильских островов было зарегистрировано 109 землетрясений, большинство из них произошли в пределах компактной группы к юго-востоку от о. Итуруп. Несмотря на большой поток событий, сильных землетрясений в данном роде отмечено не было. Ощущалось лишь одно из землетрясений, происшедшее 9 августа в 14:14 UTC ( $K_c = 11.4$ ;  $H = 50$  км), интенсивность сотрясений составила 2–3 балла в пос. Малокурильское, 2 балла – в поселках Южно-Курильск и Горячий Пляж.

5 сентября в 18:07 UTC в южной части о. Хоккайдо вблизи границы зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН произошло сильное землетрясение ( $M_w = 6.6$ ;  $M_{LH} = 7.2$ ;  $K_c = 14.5$ ;  $H = 55$  км). На территории России оно ощущалось некоторыми жителями Южных Курильских островов в поселках Южно-Курильск, Лагунное, Горячий Пляж с интенсивностью 2 балла. В течение следующих двух месяцев в очаговой зоне землетрясения было зарегистрировано большое количество афтершоков.

В октябре в районе Северных Курильских островов зарегистрировано 34 землетрясения. Большая их часть относится к очаговой зоне серии сильных землетрясений к юго-востоку от о. Парамушир, начавшейся 9 октября в 07:45 UTC событием ( $M_{LH} = 6.4$ ;  $K_c = 13.9$ ;  $H = 52$  км), ощущавшимся в г. Северо-Курильск с интенсивностью в 4 балла. Наиболее сильное землетрясение серии произошло 10 октября в 23:16 UTC ( $M_w = 6.4$ ;  $M_{LH} = 7.0$ ;  $K_c = 14.0$ ;  $H = 42$  км), ощущалось в г. Северо-Курильск и на южной оконечности п-ова Камчатка с интенсивностью в 4 балла.

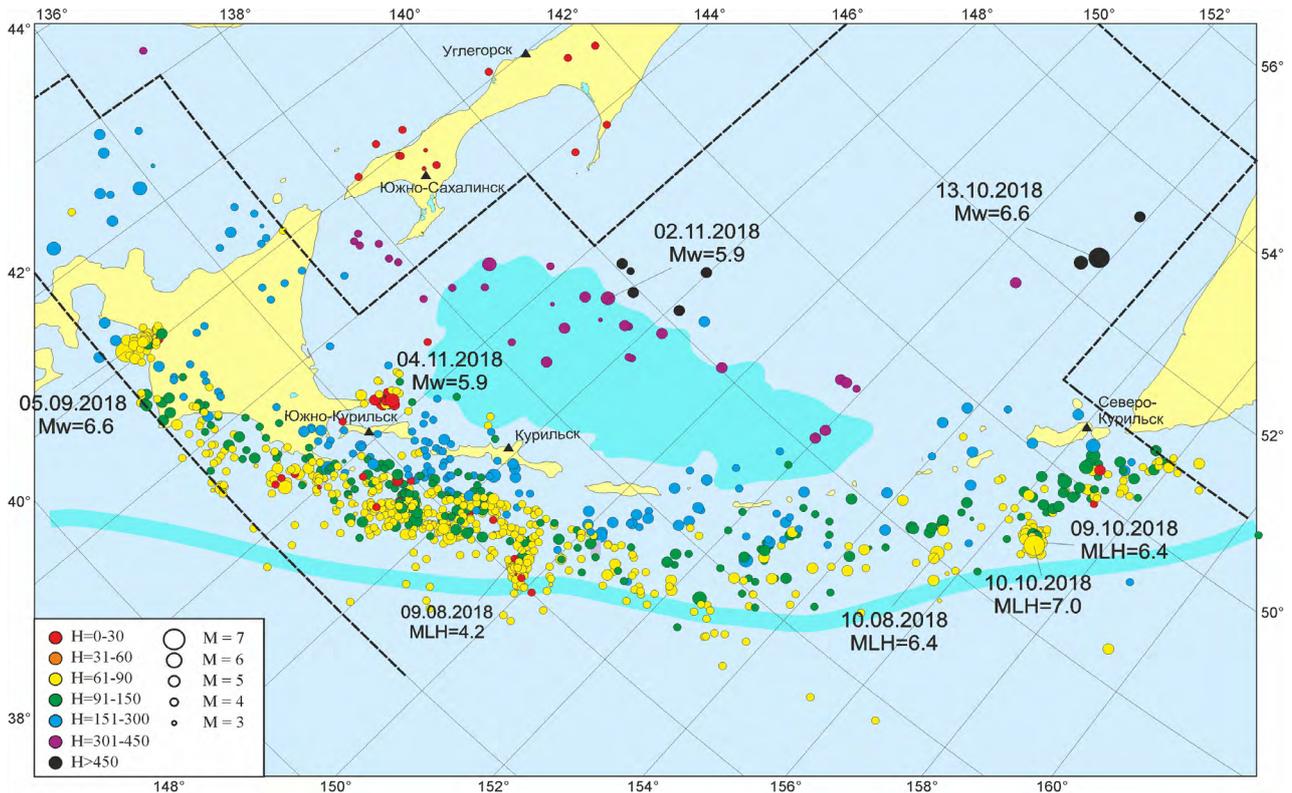


Рис. 3. Эпицентры землетрясений Курило-Охотского региона по данным оперативного каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2018 г. Энергетические характеристики приведены к магнитуде по поверхностной волне  $MLH$ .

26 октября начался рой коровых землетрясений к западу от о. Кунашир и северо-востоку от оконечности о. Хоккайдо. В серии событий выделяются 2 землетрясения 26 октября: в 03:04 UTC ( $M_w = 5.5$ ;  $K_s = 12.8$ ;  $H = 17$  км), вызвавшее колебания интенсивностью до 4–5 баллов в населенных пунктах Южных Курильских островов, и в 03:06 ( $K_s = 12.6$ ;  $H = 18$  км), ощущавшееся, несмотря на близкий энергетических класс, слабее – до 2–3 баллов. 4 ноября в 19:26 UTC ( $M_w = 5.9$ ;  $K_s = 13.0$ ;  $H = 10$  км) в этом же районе произошло еще одно сильное землетрясение, ощущавшееся в населенных пунктах о. Кунашир с интенсивностью в 5 баллов. В той же очаговой зоне в течение месяца зарегистрировано большое количество афтершоков, в том числе ощутимых.

Помимо этих событий стоит отметить сильные одиночные (или с небольшим числом афтершоков) землетрясения:

в северной части Курильской островной гряды 10 августа в 18:12 UTC ( $M_w = 6.0$ ;  $M_{LN} = 6.4$ ;  $K_s = 13.5$ ;  $H = 43$  км) (рис. 3). Несмотря на значительную удаленность, землетрясение ощутили некоторые жители г. Северо-Курильск с интенсивностью в 2 балла;

глубокофокусное землетрясение с эпицентром западнее камчатского побережья 13 октября в 11:10 UTC ( $M_w = 6.6$ ;  $M_{SH} = 7.5$ ;  $H = 515$  км). Его очаг расположен в южной части очаговой области знаменитого Охотоморского землетрясения 2013 г. [Чебров и др., 2013], механизмы очагов этих событий также очень схожи. Землетрясение ощущалось с интенсивностью 4 балла на кордоне Кроноцкого заповедника на восточном побережье Камчатки, 2–3 балла в г. Петропавловск-Камчатский, 2 балла в г. Северо-Курильск, а также поселках Южно-Курильск и Горячий Пляж на о. Кунашир;

глубокое землетрясение под северо-западным краем Курильской глубоководной котловины 2 ноября в 11:02 ( $M_w = 5.9$ ;  $M_{SH} = 7.1$ ;  $H = 445$  км) (рис. 3). На поверхности по оперативным данным оно не ощущалось.

### Макросейсмические проявления землетрясений

Особый интерес для исследователей, жителей территории и средств массовой информации представляют ощутимые землетрясения, даже если их энергия невелика. Для таких событий ведется отдельная статистика.

Сбор данных о макросейсмических проявлениях землетрясений, в первую очередь об их ощутимости жителями Курильских островов, Сахалина, в Приамурье и Приморье, осуществляется из всех доступных источников, в числе которых:

данные сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН, в зоне ответственности которых происходят ощутимые землетрясения (срочные сообщения, ежедневные сводки, опрос населения);

сообщения от сотрудников метеорологических станций Сахалинского территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды «Росгидромет»;

сообщения сотрудников Единой дежурной диспетчерской службы МЧС России муниципальных образований по Сахалинской области;

сообщения сотрудников информационных агентств;

звонки и сообщения от жителей региона.

Оценка результатов макросейсмических наблюдений проводится на основе шкалы MSK-64 [Медведев и др., 1965].

Сбор макросейсмических данных на Сахалине при землетрясениях с интенсивностью сотрясений не менее 5 баллов, как правило, производится сотрудниками отдела сводной обработки сейсмологических данных СФ ФИЦ ЕГС РАН, которые оперативно выезжают в населенные пункты острова с целью сбора данных о характере и границах области макросейсмических проявлений землетрясений.

В 2018 г. в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН макросейсмический эффект проявили 76 землетрясений:

5 ощутимых землетрясений в Приамурье и Приморье, наиболее сильно ощущалось событие 1 февраля в 09:44 UTC ( $M_w = 4.2$ ;  $H = 18$  км, 1 на рис. 4) с интенсивностью до 4 баллов в поселках Хурмули, Горин, Боктор Хабаровского края.

10 ощутимых землетрясений на о. Сахалин: 7 – в северной и 3 – в южной части острова; сильнее всего ощущалось землетрясение 7 октября в 16:21 UTC ( $K_s = 9.5$ ;  $H = 10$  км, 2 на рис. 4) – 4 балла в пос. Хоэ.

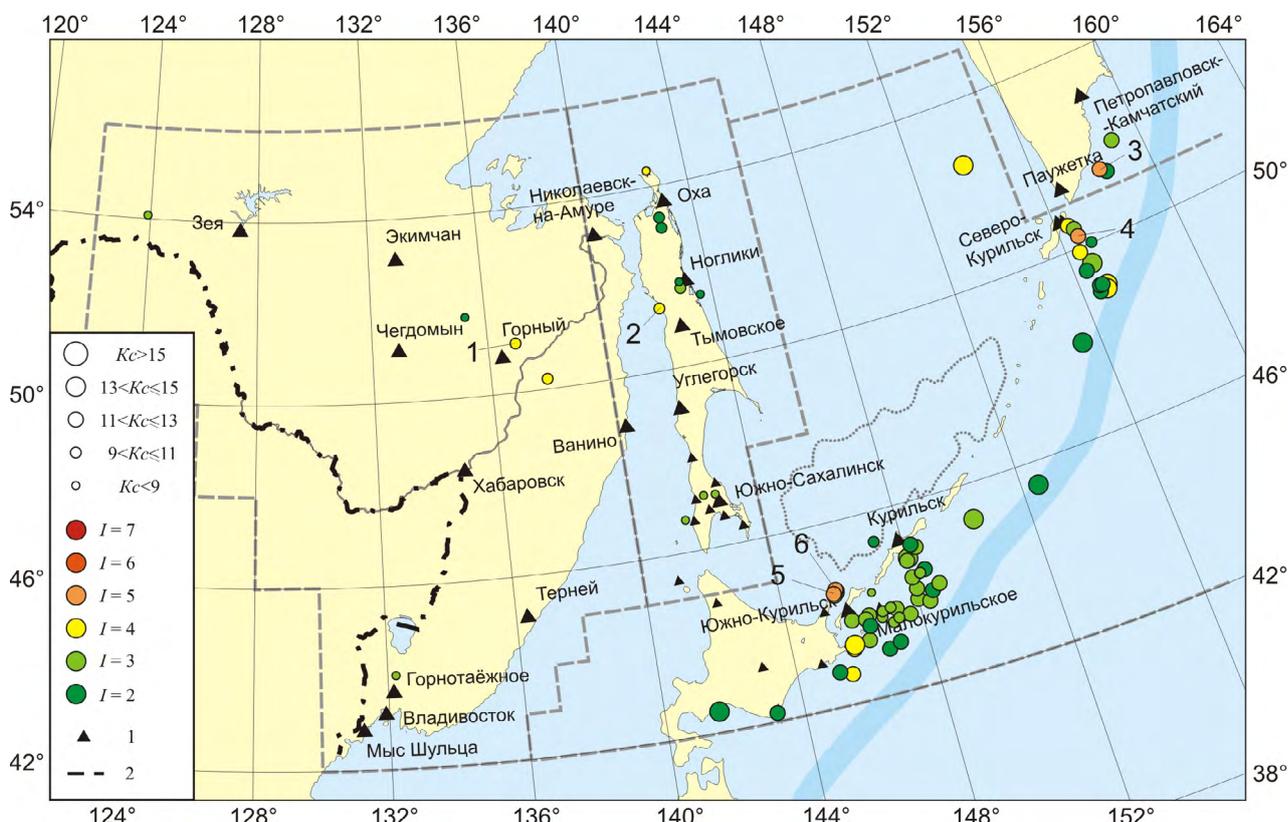


Рис. 4. Карта эпицентров ощутимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН за 2018 г. по данным оперативного каталога.  $K_s$  – энергетический класс С.Л. Соловьева;  $I$  – интенсивность сотрясений, балл; 1 – сейсмическая станция; 2 – граница региона.

17 на севере Курильской гряды (из них 3 землетрясения с эпицентрами у юго-восточного побережья п-ова Камчатка за пределами зоны оперативной ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН). Максимальная интенсивность сотрясений составила 5 баллов в г. Северо-Курильск от землетрясения 6 июля в 01:40 UTC ( $M_{LH} = 5.6$ ;  $H = 90$  км, 3 на рис. 4) с эпицентром у побережья Камчатки; из землетрясений в зоне ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН сильнее всего, с интенсивностью в 4–5 баллов, ощущалось землетрясение в г. Северо-Курильск 2 августа в 23:16 UTC ( $K_s = 14$ ;  $H = 42$  км, 4 на рис. 4).

44 землетрясения (из которых 2 события на о. Хоккайдо) ощущались жителями Южных Курильских островов, наибольший макросейсмический эффект вызвали упоминавшиеся выше землетрясения с эпицентрами западнее о. Кунашир: 26 октября в 03:04 UTC ( $M_w = 5.5$ ;  $K_s = 12.8$ ;  $H = 17$  км, 5 на рис. 4), ощущавшееся в пос. Южно-Курильск как 4–5 баллов, в Головинно, Лагунное, Горячий Пляж, Менделеево – 4 балла; и 4 ноября в 19:26 UTC ( $M_w = 5.9$ ;  $K_s = 13.0$ ;  $H = 10$  км, 6 на рис. 4), с интенсивностью сотрясений в поселках Южно-Курильск, Головинно, Лагунное, Горячий Пляж и Менделеево в 5 баллов.

На рис. 4 показаны эпицентры всех ощутимых землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2018 г. В случае промежуточных баллов (например, 3–4) значения округлялись в большую сторону.

### Сейсмическая активность и график Беньофа

В целях сравнения сейсмичности зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН в 2018 г. с наблюдениями предыдущих лет для Курило-Охотского региона был построен график накопления условной деформации (рис. 5) по Беньофу [Benioff, 1951]:

$$e = \frac{\sum \sqrt{E}}{T} \quad (1)$$

Как видно из рис. 5, в последнее десятилетие скорость накопления условной деформации в регионе была относительно стабильной, несколько выделяются наличием

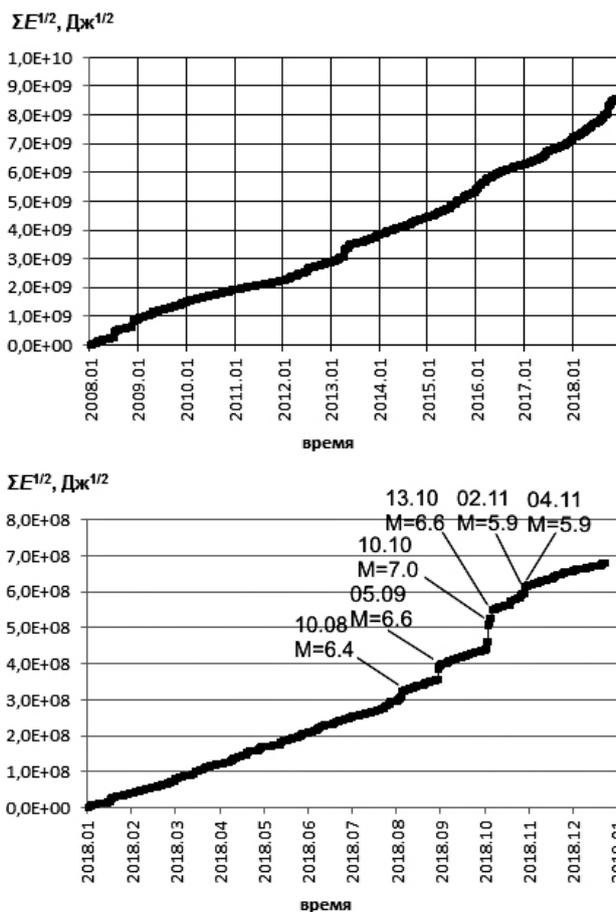


Рис. 5. График Беньофа для Курило-Охотского региона по данным каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН за 2008–2018 гг. (вверху) и оперативного каталога за 2018 г.

крупных сейсмических событий 2008, 2013 и 2016 гг. На этом фоне 2018 г. отмечен значительным уступом на графике. Как видно из нижней части рис. 5, в первом полугодии 2018 г. рост графика также указывает на фоновую сейсмичность и отсутствие сильных событий, значительная ступень в 2018 г. обусловлена рядом сильных землетрясений во втором полугодии, описанных выше.

На рис. 6 показан график повторяемости землетрясений Курило-Охотского региона, построенный для интервала 2008–2018, для сравнения на графике показаны значения диапазонов по данным 2018 г. Как можно убедиться, повторяемость землетрясений в 2018 г. соответствует десятилетнему тренду, но имеется некоторый избыток сильных ( $M \geq 6.5$ ) землетрясений и недостаток в интервале  $M = 5.5–6.0$ , хотя это может быть связано с некорректным определением магнитуд сильных землетрясений.

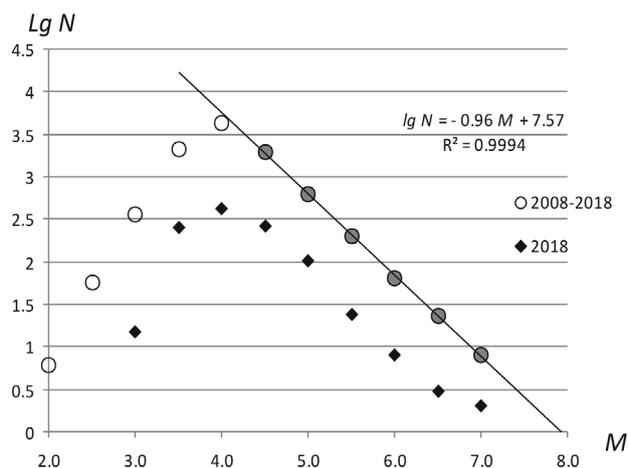


Рис. 6. График повторяемости землетрясений Курило-Охотского региона в 2008–2018 гг.

Пространственное распределение сейсмичности отражено на карте сейсмической активности территории для энергетического уровня  $A_{10}$ , построенной методом суммирования с постоянной детальностью [Ризниченко, 1964]:

$$A_{10} = \frac{1 - 10^{-\gamma}}{10^{-\gamma(K_{\min} - 10)}} * \frac{S_0 T_0}{ST} * N_{\Sigma} \quad (2)$$

где  $A_{10}$  – число очагов землетрясений в заданном диапазоне энергетического класса (в данном случае класса С.Л. Соловьева,  $K_c = 10 \pm 0.5$ ), происходящих на данной территории в единицу времени  $T_0$  (1 год), нормированное на площадь  $S_0$ , традиционно принимаемую в 1000 км<sup>2</sup>;  $K_{\min}$  – минимальный уровень представительной регистрации для данной территории;  $S$  – площадь площадки усреднения;  $T$  – период времени, охватываемый использованным каталогом землетрясений;  $\gamma$  – угол наклона графика повторяемости землетрясений исследуемой территории;  $N_{\Sigma}$  – количество всех событий представительного класса  $K_c \geq K_{\min}$  на площадке усреднения  $S$  за время  $T$ .

Подобный метод удобен для представления сейсмичности регионов с неравномерным охватом территории сетями наблюдений. Помимо этого методика данного расчета слабее зависит от погрешностей определения магнитуды сильных землетрясений, чем методики расчета карт, основанных на сейсмической энергии или сейсмическом моменте, что при наличии значительных проблем Сахалинского филиала в точности

определения магнитуд особенно важно. Для сравнения на рис. 7 приводятся карты сейсмической активности для территории Курило-Охотского региона за десятилетний период 2008–2017 гг. и за 2018 г.

Угол наклона графика повторяемости  $\gamma$  энергетического класса получен пересчетом коэффициента наклона  $b$  графика повторяемости магнитуд (рис. 6) с учетом соотношения этих величин из формулы [Соловьев, Соловьева, 1967]:

$$K_c = 2 M_{LH} + 1.2 \quad (3)$$

Размер площадки усреднения  $S$  принимался равным  $0.3 \times 0.3^\circ$ . Параметр  $A_{10}$  рассчитывался скользящим окном площадью  $S$  с шагом  $0.1^\circ$  по широте и  $0.1^\circ$  по долготе. В 2018 г. в связи с меньшим количеством событий размер ячеек был увеличен, т.е.  $0.6 \times 0.6^\circ$  с шагом  $0.2^\circ$ .

Как видно из графика Беньофа (рис. 5) и карты сейсмической активности (рис. 7), в предшествующее десятилетие на Курильских островах не было больших сейсмических активизаций, сопровождавшихся катастрофическими землетрясениями, подобными Симуширским событиям 2006–2007 гг. [Рогожин, Левина, 2013] или Шикотанскому 1994 г. [Злобин и др., 2008]. Поэтому оценки сейсмической активности в этом десятилетии можно отнести к фоновому уровню, характерному для данной сейсмоактивной зоны в период между крупнейшими землетрясениями. Как и следовало ожидать, наиболее сейсмически активна зона контакта литосферных плит в промежутке между глубоководным желобом и островной дугой. Задуговая внутриплитовая активность, как и области погруженной Тихоокеанской плиты под Охотским морем, существенно менее сейсмически активны. Впрочем, про глубокие области нельзя говорить с полной уверенностью, так как представительность каталога оценивалась вдоль поверхности и без учета глубины.

Можно сделать вывод, что в 2018 г. наиболее сейсмически активными оказались Северные Курилы, где значения  $A_{10}$  превышают средние за последние 10 лет, здесь можно говорить о небольшой сейсмической

активизации. На Южных Курилах сейсмическая активность оставалась в пределах значений, характерных для предыдущих 10 лет. На Средних Курилах (между островами и желобом) сейсмическая активность ниже средней, т.е. наблюдался небольшой спад активности. В целом сейсмическая активность выше 0.1 считается умеренной, выше 1 – высокой [Сейсмическое районирование... , 1978]. То есть сейсмическую

активность Северных и Южных Курил можно считать высокой, что является обычным для данного региона, на средних Курильских островах в 2018 г. сейсмическую активность можно охарактеризовать как умеренную, ниже средних значений.

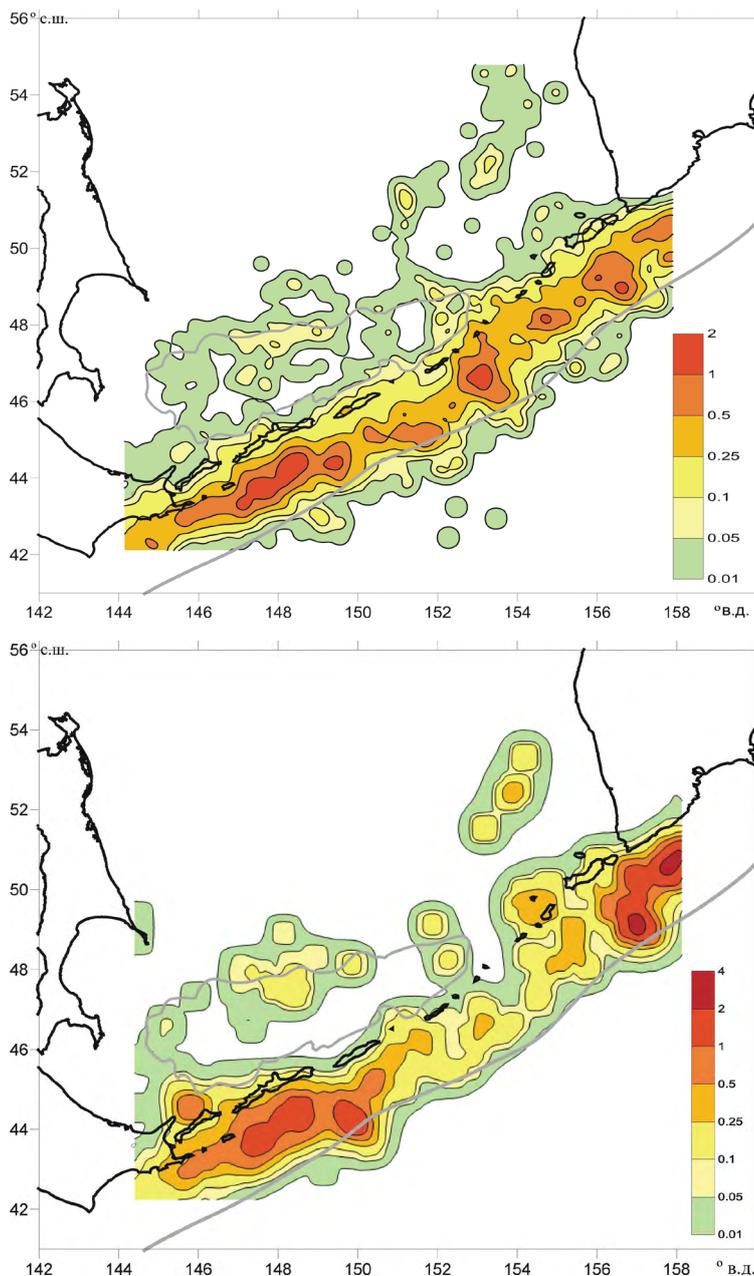
### Механизмы очагов землетрясений

Механизмы очагов землетрясений являются дополнительным параметром характеристики

очагов, не входящим в основной каталог землетрясений. Ежегодно составляется отдельный каталог механизмов очагов землетрясений зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН, включающий несколько десятков, как правило, наиболее сильных событий регионов. С недавнего времени Сахалинский филиал в сотрудничестве с ИМГиГ ДВО РАН начал массовое определение тензора сейсмического момента очага землетрясения, как более полной характеристики очага, чем классический механизм в двух-дипольном приближении.

Расчет тензора сейсмического момента осуществляется с применением программного комплекса ISOLA [Sokos, Zahradnik, 2013; Сафонов, Коновалов, 2014]. Для инверсии волновых форм использовались записи широкополосных велосиграфов, установленных на стационарных пунктах наблюдения СФ ФИЦ ЕГС РАН (рис. 1). Дополнительно привлекались записи сейсмических станций КФ ФИЦ ЕГС РАН, а также широкополосных станций сети F-Net агентства NIED, Япония [NIED]. В ходе расчета помимо компонент тензора сейсмического момента, ориентации главных осей напряжений и двух нодальных плоскостей также определяется моментная магнитуда землетрясений. В каталог включаются события с устойчивым решением и показателем сходимости  $V_r \geq 0.2$ .

Всего по оперативным данным были получены решения для 36 зем-



**Рис. 7.** Сейсмическая активность Курило-Охотского региона по данным каталога землетрясений СФ ФИЦ ЕГС РАН: сверху – 2008–2017 гг.; внизу – 2018 г. Изолинии оконтуривают области, где ежегодное количество землетрясений энергетического класса  $K_s = 10$  из расчета на  $1000 \text{ км}^2$  равно либо превышает указанное значение.

летрясений, включая 3 в регионе Приамурье и Приморье, 1 в Сахалинском регионе и 32 в Курило-Охотском регионе. На рис. 2 и 8 показаны стереограммы механизмов очагов в двухдипольном приближении (в проекции на нижнюю полусферу).

В Приамурье определен механизм очага наиболее сильного землетрясения, произошедшего 7 июля в 08:51 UTC ( $M_w = 4.9$ ;  $K_p = 13.7$ ;  $H = 9$  км, 17 на рис. 2). В очаге реализовался сдвиг, вероятнее всего – правый, вдоль субширотной нодальной плоскости, если исходить из основной направленности разломов данного района. Два других землетрясения: 01 февраля в 09:44 ( $M_w = 4.2$ ;  $H = 18$  км, 3 на рис. 2) и 22 сентября в 03:39 ( $M_w = 3.7$ ;  $H = 10$  км, 27 на рис. 2), судя по полученным решениям механизмов очагов, произошли в сходных тектонических условиях – СВ-ЮЗ сжатия и ССЗ-ЮЮВ растяжения с преобладанием сдвигового типа сейсмодислокации. Это хорошо согласуется с преобладающим в регионе полем тектонических напряжений [Сафонов, 2018].

В Сахалинском регионе определен механизм очага землетрясения 12 сентября

в 05:49 UTC с эпицентром в море к северу от п-ова Шмидта ( $M_w = 4.0$ ;  $K_s = 11$ ;  $H = 10$  км, 26 на рис. 2). Полученное решение оказалось неустойчивым в связи с малым числом качественно записавших его станций, согласно ему здесь реализовался взбросо-сдвиг в условиях ССВ-ЮЮЗ сжатия.

В Курило-Охотском регионе произошло несколько коровых событий, относящихся к Охотоморской плите: событие 5 сентября (22 на рис. 8) и его афтершоки (23, 24, 28, 29 на рис. 8) в районе о. Хоккайдо; землетрясения 26 октября и 4 ноября (32, 34) севернее. За исключением сильнейшего события 5 сентября, классифицируемого как взрез с вертикальной плоскостью меридионального простирания, остальные события в основном являются взбросовыми.

Остальные события с определенными механизмами очагов в Курило-Охотском регионе относятся к субдуцирующей Тихоокеанской плите и зоне ее контакта с Охотоморской. Здесь отмечены все обычные для региона виды сейсмодислокаций: сбросовые события на изгибе Тихоокеанской плиты (13, 21 на рис. 8); подвиги в зоне контакта плит

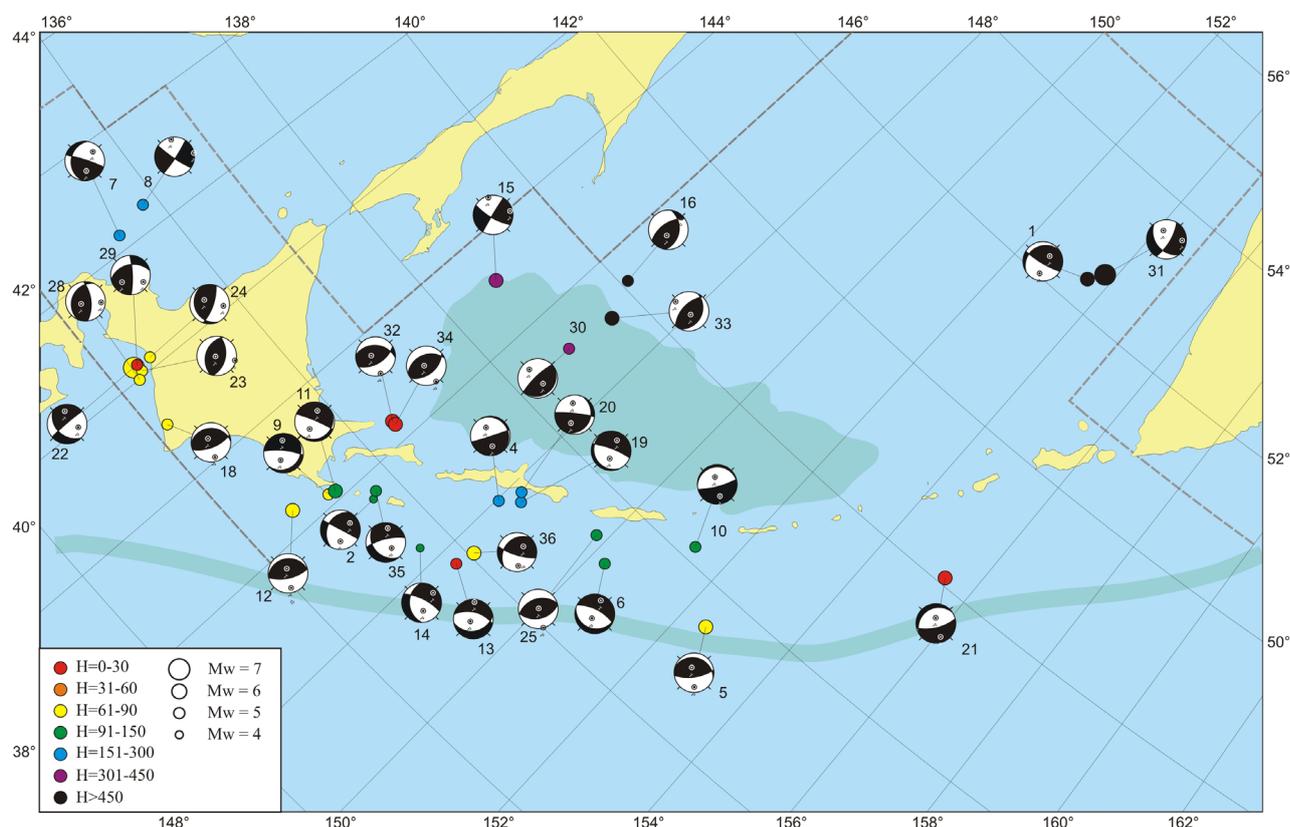


Рис. 8. Механизмы очагов землетрясений Курило-Охотского региона в 2018 г. по данным СФ ФИЦ ЕГС РАН.

(5, 12, 36); и особенно много в этом году землетрясений в зоне промежуточных глубин (2, 4, 6, 9, 10, 11, 19, 20, 25) с характерными для этого района механизмами с субвертикальной нодальной плоскостью, по классификации относительно поверхности – взрез.

Особенно стоит отметить землетрясения 23 и 27 июля (19, 20 на рис. 8) с эпицентрами в районе о. Итуруп, эти события с моментной магнитудой  $M_w = 5.1$ , глубинами  $H = 103$  км и  $H = 143$  км и близкими эпицентрами имеют противоположные механизмы. Можно предположить, что их гипоцентры находятся в разных частях двойной сейсмофокальной зоны, образованной изогнутой плитой: событие 23 июля – в нижней зоне сжатия, а событие 27 июля – в верхней зоне растяжения. Интересно также, что именно в данном районе, согласно [Christova, 2015], двойной сейсмогенерирующий слой по массиву данных не прослеживается. К сожалению, точности гипоцентрии по оперативным данным СФ ФИЦ ЕГС РАН недостаточно для отнесения гипоцентров данных событий к конкретным слоям двойной сейсмофокальной зоны.

Среди глубокофокусных событий особенно выделяется сильное землетрясение 13 октября (31, рис. 8), произошедшее в южной части очаговой области Охотоморского землетрясения 2013 г. [Чебров и др., 2013]. Механизмы очага этих событий очень схожи. Вероятный его форшок 18 октября (1, рис. 8), однако, имеет другой тип сейсмодислокации. Остальные глубокофокусные землетрясения с эпицентрами в Охотском (15, 16, 30, 33) и Японском (7, 8) морях также, судя по механизмам их очагов (взбросы, сдвиги и взрезы), произошли в условиях, характерных для данных участков субдущурующей плиты [Сафонов, 2019].

## Выводы

По оперативным данным Сахалинского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» в 2018 г. были определены параметры 1112 землетрясений, получены решения 36 механизмов очагов землетрясений.

В сейсмическом отношении 2018 год для территории зоны ответственности СФ ФИЦ ЕГС РАН выдался относительно спокойным, не происходило событий катастрофического уровня, подобных Симуширским землетрясениям 2006–2007 гг. или Шикотанскому землетрясению 1994 г. Магнитуда наиболее сильного землетрясения 10 октября, согласно оперативным данным, составила  $M_{LN} = 7.0$ , хотя по совокупности всех энергетических характеристик и макросейсмических проявлений это значение, скорее всего, несколько завышено. Тем не менее на фоне последнего десятилетия число сильных землетрясений магнитудой  $M > 6.0$  оказалось несколько выше среднего.

В Сахалинском регионе значительных событий не было и общее число землетрясений, как и интенсивность их макросейсмических проявлений, оказались ниже среднегодового уровня.

В Приамурье и Приморье общее число как коровых, так и глубокофокусных землетрясений осталось примерно на уровне средних значений, было отмечено одно сильное землетрясение, произошедшее, однако, вдали от населенных пунктов и не вызвавшее серьезных последствий.

В Курило-Охотском регионе несколько выше среднего оказалась сейсмическая активность Северных Курильских островов, ниже среднего – в средней части гряды, Южные Курильские острова проявили обычную для них высокую сейсмическую активность.

## Список литературы

1. Габсагарова И.П. Границы сейсмоактивных регионов с 2004 г. // *Землетрясения России в 2004 году*. Обнинск: ГС РАН, 2007. С. 139.
2. Злобин Т.К., Поплавская Л.Н., Левин Б.В., Сафонов Д.А., Полец А.Ю., Рудик М.И. Вариации поля упругих напряжений и основные сейсмодислокации в очаговой зоне Шикотанского землетрясения 04(05) октября 1994 г. // *Доклады Академии наук*. 2008. Т. 419, № 6. С. 820–823.
3. Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. *Шкала сейсмической интенсивности MSK-64*. М.: МГК АН СССР, 1965. 11 с.
4. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // *Эксперимен-*

- ральная сейсмика. М.: Наука, 1964. С. 88–93. (Труды ИФЗ АН СССР; № 32(199)).
5. Ризниченко Ю.В. Метод суммирования землетрясений для изучения сейсмической активности // *Изв. АН СССР. Сер. геофиз.* 1964. № 7. С. 969–977.
6. Рогожин Е.А., Левина В.И. Симуширские землетрясения 15 ноября 2006 г. (I) и 13 января 2007 г. (II) с  $M_w=8.3$  и  $M_w=8.1$  (Средние Курилы) // *Землетрясения Северной Евразии, 2007 г.* Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 326–338.
7. Сафонов Д.А. Современное поле тектонических напряжений территории Приамурья // *Геодинамика и тектонофизика.* 2018. Т. 9, № 3. С. 1025–1037. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0382
8. Сафонов Д.А. Пространственное распределение тектонических напряжений в южной глубокой части Курило-Камчатской зоны субдукции // *Геосистемы переходных зон.* 2019. Т. 3, № 2. С. 175–188. doi:10.30730/2541-8912.2019.3.2.175-188
9. Сафонов Д.А., Коновалов А.В. Использование программы ISOLA для определения тензора сейсмического момента землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов // *Тихоокеанская геология.* 2017. Т. 36, № 3. С. 102–112.
10. *Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г.* / отв. ред. В.И. Бунз, Г.П. Горшков. М.: Наука, 1980. 308 с.
11. Семенова Е.П., Костылев Д.В., Михайлов В.И., Паршина И.А., Ферчева В.Н. Оценка сейсмичности южного Сахалина по методике СОУС'09 // *Геосистемы переходных зон.* 2018. Т. 2, № 3. С. 191–195. doi:10.30730/2541-8912.2018.2.3.191-195
12. Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой Курильских землетрясений // *Физика земли.* 1967. № 2. С. 13–22.
13. Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Дорошкевич Е.Н., Костылев Д.В. Курило-Охотский регион // *Землетрясения Северной Евразии, 2011 год.* Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 170–180.
14. Фокина Т.А., Коваленко Н.С., Костылев Д.В., Левин Ю.Н., Лихачева О.Н., Михайлов В.И. Приамурье и Приморье, Сахалин и Курило-Охотский регион // *Землетрясения России в 2016 году.* Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 45–53.
15. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А., Кравченко Н.М., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Раевская А.А., Салтыков В.А., Чебров Д.В., Ландер А.В. Глубокое Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. с магнитудой  $M_w = 8.3$  – сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле.* 2013. № 1, вып. 21. С. 17–24.
16. Benioff H. Earthquakes and rock creep // *Bulletin of the Seismological Society of America.* 1951. Vol. 41, N 1. P. 31–62.
17. Christova C.V. Spatial distribution of the contemporary stress field in the Kurile Wadati-Benioff zone by inversion of earthquake focal mechanisms // *J. of Geodynamics.* 2015. Т. 83. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2014.11.001>
18. NIED – National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan. URL: <http://www.fnet.bosai.go.jp>
19. Sokos E., Zahradnik J. Evaluating Centroid-Moment-Tensor Uncertainty in the New Version of ISOLA Software // *Seismological Research Letters.* 2013. Vol. 84. P. 656–665. <https://doi.org/10.1785/0220130002>

#### Об авторах

САФОНОВ Дмитрий Александрович (ORCID 0000-0002-2201-2016), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, программист отдела сводной обработки сейсмологических данных, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск; ФОКИНА Татьяна Александровна, начальник отдела, КОВАЛЕНКО Наталья Семеновна, ведущий инженер – отдел сводной обработки сейсмологических данных, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск.

## Методические аспекты исследования сейсмических последовательностей методом СРП (саморазвивающиеся процессы) на примере Невельского землетрясения на Сахалине

© 2019 А. С. Закупин\*, Н. В. Богинская, М. Ю. Андреева

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

\*E-mail: a.zakupin@imgg.ru

**Реферат.** Обсуждаются особенности применения метода анализа форшоковых последовательностей СРП (саморазвивающиеся процессы) в Сахалинском регионе. На примере Невельского землетрясения (2007 г.,  $M = 6.2$ ) методом площадного сканирования оценены характеристики активизаций, предшествующих главному толчку. Предложен универсальный подход для оценки сейсмической опасности методом СРП. Выполнены расчеты для каталога слабых землетрясений с магнитудами  $M \leq 3$  и для полного каталога сейсмических событий без ограничений по магнитуде, показано преимущество выборки слабых событий. С целью уменьшения влияния на результаты расчетов релаксационных процессов в очагах землетрясений, предшествующих Невельскому, проведена процедура декластеризации каталога. Установлена связь формирующихся последовательностей с развитием очаговой области и появлением аномальных значений параметра LURR (load-unload response ratio). Получен ряд признаков, по которым в режиме реального времени можно выделить место и время (с точностью до недель) главного события.

**Ключевые слова:** сейсмичность, сейсмические события, метод LURR, каталог землетрясений, разлом, сейсмический прогноз.

*Для цитирования:* Закупин А.С., Богинская Н.В., Андреева М.Ю. Методические аспекты исследования сейсмических последовательностей методом СРП (саморазвивающиеся процессы) на примере Невельского землетрясения на Сахалине. *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 4. С. 377–389.

<https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389>

## Methodological aspects of the study of seismic sequences by SDP (self-developing processes) on the example of the Nevel'sk earthquake on Sakhalin

A.S. Zakupin\*, N.V. Boginskaya, M. Yu. Andreeva

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

\*E-mail: a.zakupin@imgg.ru

**Abstract.** The peculiar features of the application of the SDP (self-developing processes) method of foreshock sequences analysis for the Sakhalin region have been discussed. On the example of the Nevel'sk earthquake (2007,  $M = 6.2$ ), the characteristics of activations prior to the main shock have been estimated. Calculations were made for the catalogue of weak earthquakes with magnitudes  $M \leq 3$  and for the complete catalogue of seismic events without limitations on magnitude. Weak events samplings have manifested their advantage. The declustering exerted influence on the results reducing the relaxation effect in the source sites of the earthquakes occurred before the Nevel'sk. The relationship has been established between the SDP sequences progressing in the focal area and the appearance of the LURR (load-unload response ratio) parameter anomaly. A number of indicators have been obtained, which allow the place and time allocation (up to few weeks accuracy) of waiting main event.

**Keywords:** seismicity, seismic events, LURR method, earthquakes catalog, fault, prediction.

*For citation:* Zakupin A.S., Boginskaya N.V., Andreeva M. Yu. Methodological aspects of the study of seismic sequences by SDP (self-developing processes) on the example of the Nevel'sk earthquake on Sakhalin. *Geosystems of Transition Zones*. 2019, vol. 3, N 4, pp. 377–389. (In Russian). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389>

## Введение

Ни одна из научных проблем геофизики не вызывала столь бурных дискуссий и полярных мнений, как проблема прогноза землетрясений (ЗЛТ). Существуют разные точки зрения на эту актуальную проблему [Hamilton, 1974; Geller, 1997; Geller et al., 1997; Kagan, 1997; Wyss, 1997; Соболев, 1999; Зубков, 2002; Завьялов, 2006; Arellano-Baeza et al., 2006; и др.]. Основные аргументы ученых-скептиков сводятся к несоответствию результатов в данной области финансовым вложениям в нее, например в Японии. Однако в Японии львиная доля средств вынужденно тратилась на инфраструктуру (создание и эксплуатацию достаточно плотных сетей наблюдений, хранение данных), а не на сами исследования [Swinbanks, 1992]. В то же время имеются примеры успешных прогнозов ЗЛТ в Китае, на Камчатке, на о. Сахалин (землетрясение в Хайчэне 1975 г.,  $M_w = 7.3$ ; [Zhang, Fu, 1981; Wang et al., 2006]; Кроноцкое землетрясение 1997 г.,  $M_w = 7.9$  [Матвиенко, 1998]; Невельское землетрясение 2007 г.,  $M_w = 6.2$  [Тихонов, 2009]), в том числе сделанных не ретроспективно, а в режиме реального времени.

Три разрушительных землетрясения на о. Сахалин (Нефтегорское 1995 г. с магнитудой  $M_w = 7.2$  на северо-востоке острова, Углегорское 2000 г. с  $M_w = 7.0$  в центральной его части и Невельское 2007 г. с  $M_w = 6.2$  на юге) указали на высокий уровень сейсмической опасности этого региона. Согласно картам ОСР-2015, для северного Сахалина и западной части среднего Сахалина исходная интенсивность сотрясений принята равной 9 баллам по 12-балльной шкале MSK-64 при среднем периоде повторения 500 лет и 9–10 баллам при 1000 лет, а для восточной части среднего Сахалина и юга Сахалина – на один балл ниже. Этими обстоятельствами было инициировано развитие сети сейсмостанций на Сахалине и организация полноценной сейсмологической службы в начале 2000-х годов. С 2011 г. данные в сети СФ ФИЦ ЕГС РАН передаются в центр в автоматическом режиме, а каталоги получили высокую представительность за счет высо-

кой плотности сети (особенно на юге острова). Это благоприятствовало исследованиям сейсмического режима, включая разработку новых подходов к прогнозам ЗЛТ и адаптацию имеющихся к местным условиям.

Исключительная сложность задачи прогноза предполагает определенную этапность ее решения. В процессе реализации отдельных этапов прогноза – долгосрочного, среднесрочного и краткосрочного – должно происходить постепенное уточнение оценок, приводящее к снижению неопределенности предсказания силы и времени землетрясения.

Представленная работа является продолжением исследований, проведенных в ИМГиГ ДВО РАН Иваном Николаевичем Тихоновым, который впервые применил поэтапный подход прогноза для о. Сахалин. Последние результаты в этих работах были получены десять лет назад и, понятно, еще не могли опираться на детальные инструментальные наблюдения локальной сейсмической сети (в основном использовался каталог NEIC). Тем не менее ретроспективно для района северного Сахалина с помощью алгоритма M8 была показана [Тихонов, Левин, 2015] возможность прогноза одной из самых трагичных катастроф России – Нефтегорского ЗЛТ 1995 г. ( $M_w = 7.2$ ). Сейсмологами ИМГиГ ДВО РАН в декабре 2005 г. был подготовлен долгосрочный прогноз сильного ЗЛТ с  $M_w = 6.6$  на юго-западном шельфе о. Сахалин. Основой прогноза послужили предвестники – сейсмические бреши первого и второго рода, которые были надежно картированы на юго-западном шельфе острова вблизи городов Невельск, Холмск по историческим данным о сильных землетрясениях и детальным данным сети цифровых сейсмостанций на юге о. Сахалин. Прогноз был утвержден в августе 2006 г. Российским экспертным советом по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска. Началом его реализации явилось Горнозаводское ЗЛТ 17.08.2006 г. с магнитудой  $M_w = 5.6$ . Через 6 дней после его возникновения И.Н. Тихоновым и Ч.У. Кимом был подготовлен среднесрочный прогноз более сильного события в районе тревоги. Примерно через год долгосрочный и среднесрочный

прогнозы полностью реализовались Невельским ЗЛТ 02.08. 2007 г. с магнитудой  $M_w = 6.2$  [Тихонов, 2006; Тихонов, Ким, 2008].

Следуя логике стадийности сейсмического процесса, в дополнение к среднесрочным (или, скорее, долгосрочным) методам оценки опасности Тихонов применил метод СРП (саморазвивающихся процессов) [Малышев, 1991; Малышев, Малышева, 2018]. А.И. Малышевым [Малышев, 1991] показано, что определению саморазвития соответствует хорошо известная эмпирическая зависимость Омори для числа афтершоковых толчков, а в дальнейшем эта и ряд подобных ей эмпирических закономерностей развития форшокового и афтершокового процессов были обобщены в виде нелинейного дифференциального уравнения второго порядка [Малышев, Тихонов, 2007]. Под саморазвивающимися процессами подразумевались [Малышев, 1991] такие процессы, при протекании которых изменение состояния соответствующих систем определяется текущим их состоянием. В нашей работе мы будем рассматривать только СРП, которые могут иметь отношение к форшоковым активизациям сейсмичности перед сильными землетрясениями.

Было проведено исследование сейсмичности по методу СРП для юга о. Сахалин на детальном каталоге мелкофокусных землетрясений с  $M > 2.6$  за 12-летний (2003–2014 гг.) период наблюдений [Тихонов и др., 2017]. За данный период было проанализировано 8 землетрясений с  $M = 4.6–6.2$ . И.Н. Тихонов с соавторами отмечали, что результаты могли бы быть лучше при наличии длительного (  $M > 2.0$  ) каталога ЗЛТ по югу о. Сахалин. Несмотря на ретроспективные оценки ожидаемого события с точностью до минут, были проблемы соответствия прогнозных оценок реальным событиям. Одна из них – «залипание» прогнозной оценки времени сильнейшего толчка к концу обрабатываемой активизации в случае ее резкого ступенчатого нарастания. Это может происходить в течение 10 и более дней, а метод все это время будет давать прогноз, что ожидаемое землетрясение произойдет завтра. При этом «ступенька» может завершиться и без тако-

го землетрясения. Другая проблема состоит в выборе расчетной области для оперативного прогнозирования. Размер очаговой области для землетрясений с магнитудой 5–6 примерно 50 км. В работе [Тихонов, Ким, 2008] авторы выбрали расчетную область с радиусом в 160 км, это фактически весь юг Сахалина. Кроме того, с позиций сеймотектонической модели Сахалина такие размеры на юге острова перекрывают сразу несколько сейсмогенерирующих областей [Левин и др., 2012]. Ну а главным и очевидным минусом для полученных результатов [Тихонов, Ким, 2008] является необходимость в «настройке» алгоритма, или, точнее, его параметров, для реализации моделей СРП, причем универсальностью они не отличаются.

Нашей задачей будет определение минимально возможных размеров расчетной зоны с учетом приведенных выше ограничений и при сохранении необходимого для расчета количества сейсмических событий (например, при проведении декластеризации). Наилучшим объектом для проверки метода может быть землетрясение в Невельске в августе 2007 г. ( $M_w = 6.2$ ), так как в южной части острова сейсмическая сеть наиболее развита, а кроме того, один из главных результатов авторов [Тихонов, Ким, 2008, Tikhonov, Rodkin, 2012] был получен на о. Сахалин именно для этого события.

### Методика и результаты

В статье применен метод СРП, разработанный А.И. Малышевым (ИГГ УрО РАН) [Малышев, 1991]. Этот метод в результате многолетней работы апробирован на данных наблюдений в различных сейсмоактивных регионах [Tikhonov, Kim, 2010; Tikhonov, Rodkin, 2012]. Задача моделирования сейсмического потока до и после сильных землетрясений в методе СРП решается на основе уравнения саморазвивающихся процессов [Малышев, 1991]. Если динамика нелинейного сейсмического процесса имеет значительные отклонения от стационарного состояния  $(dx/dt) \gg (dx/dt)_0$ , то в этом частном случае уравнение СРП решается аналитически. Его решения имеют квазилинейную форму:

они либо представляют собой собственно линейную зависимость, либо сводятся к линейным зависимостям при логарифмировании. Все эти аспекты заложены в программный комплекс SeisDynamicsView. В работе [Tikhonov, Rodkin, 2012] метод применялся для предсказания Невельского землетрясения 02.08.2007 г.

Одним из настроечных параметров алгоритма является радиус  $R$ , определяющий сейсмоактивный объем для выборки землетрясений. Оптимальное значение радиуса должно обеспечить достаточное количество землетрясений в выборке и высокую точность оценок времени возникновения прогнозируемого события. Для малых выборок (число слабых толчков  $< 15$ ) результаты оценки этого параметра могут оказаться нестабильными. В результате предварительных расчетов в работах И.Н. Тихонова с коллегами [Тихонов, 2006; Тихонов, Ким, 2008; Tikhonov, Rodkin, 2012] установлено, что оптимальное значение радиуса  $R$  для Сахалина находится в диапазоне 150–180 км. Круговая область с таким радиусом покрывает практически весь изучаемый район юга Сахалина. Расчетная выборка в данном случае состояла из 41 ЗЛТ, однако перекрывала несколько совершенно разных геологических структур, составляющих сейсмоактивные зоны, например Западно-Сахалинский и Центрально-Сахалинский разломы. Это свидетельствует о необходимости уменьшения размера расчетной области, тем более что в работе [Малышев, 2019] на примере Камчатки отмечено, что прогнозируемость форшоковой активности начинает проявляться со средних радиусов (до 30 км), а на больших (до 180 км) достигает оптимальных значений. По словам авторов работы [Тихонов, Ким, 2008], каталог был предварительно декластеризован.

В данной работе для выделения афтершоковых последовательностей сейсмических событий в каталоге землетрясений используем программу, разработанную В.Б. Смирновым в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова [Смирнов, 1997]. В алгоритм программы заложен метод локального отношения интенсивностей (ЛОИ), авторами

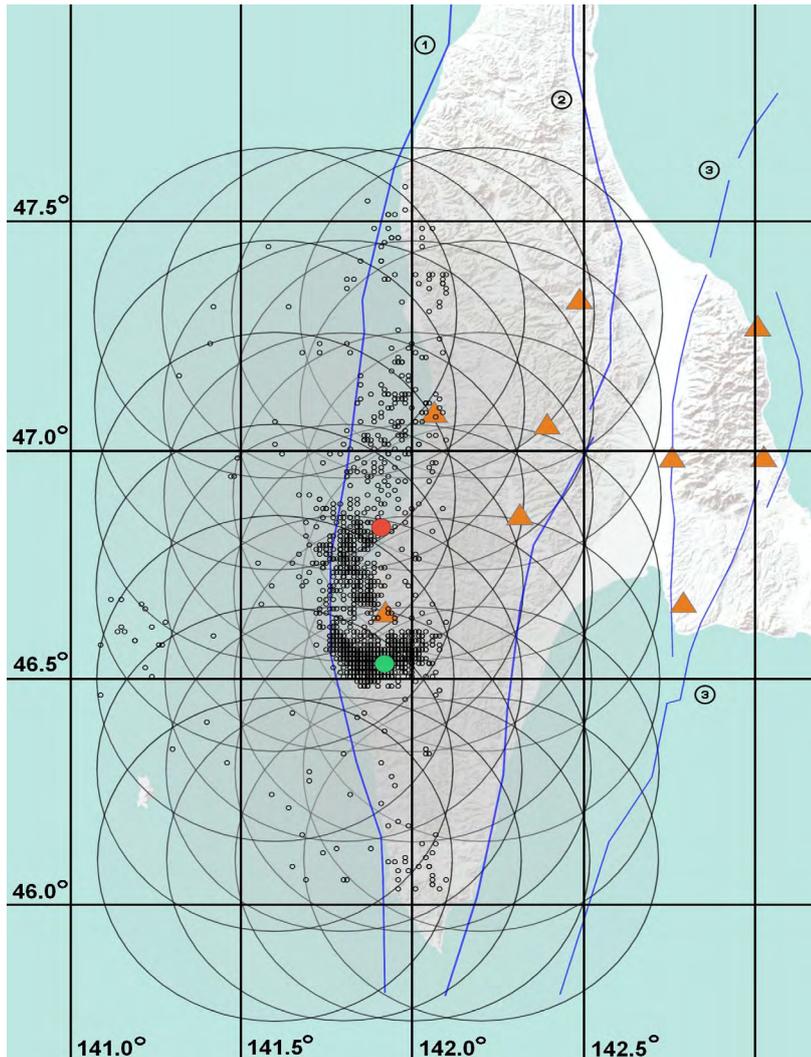
которого являются Г.М. Молчан и О.Е. Дмитриева [Молчан, Дмитриева, 1993].

Параметры расчета в методе СРП будут определены нами в начале работы и сохраняются неизменными до интерпретации результатов расчета. Выбор начальных условий должен опираться на следующие соображения:

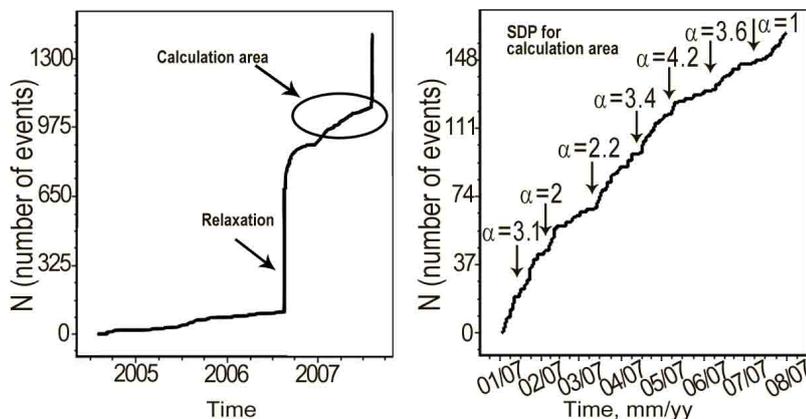
- каталог готовим только для анализа зоны Западно-Сахалинского разлома (ЗСР) с отсечением по долготе в  $142.2^\circ$ ;
- анализ проводим, так же как и в работе [Тихонов, Ким, 2008], на основе обработки каталога слабых сейсмических событий (с магнитудой не более 3.0). Дополнительно выполняем расчет и для полного каталога без ограничений по магнитуде;
- исследуемую территорию делим на 28 областей по 40 км радиусом (приемлемый размер для очаговых областей землетрясений с  $M > 6$ ), которые попарно пересекаются с площадью перекрытия 65 % (рис. 1);
- для всех областей точкой для начала анализа считаем январь 2007 г. – к этому моменту заметно снижается процесс афтершоковой релаксации в очаге Горнозаводского землетрясения августа 2006 г.

Для каждой области по мере накопления (ретроспективно, начиная с января 2007 г.) данных проводятся расчеты в программе SeisDynamicsView и при наличии решения СРП фиксируются его параметры: длительность СРП и время до реализации прогноза после фиксации решения. Данные заносятся в таблицу только для последнего СРП. На рис. 2. показан пример для зоны с координатами  $46.7\text{ N}$ ,  $142.0\text{ E}$ . Решения для четырех зон на широте  $46.7\text{ N}$  в качестве примера представлены на рис. 3. Результаты расчетов для всех зон и для двух каталогов (ЗЛТ с магнитудами  $M \leq 3$  и полного каталога ЗЛТ) сведены в табл. 1. Основными показателями выбраны: длительность СРП ( $t_4$ ), время до главного толчка после получения решения ( $t_5$ ), количество независимых решений для всей расчетной области.

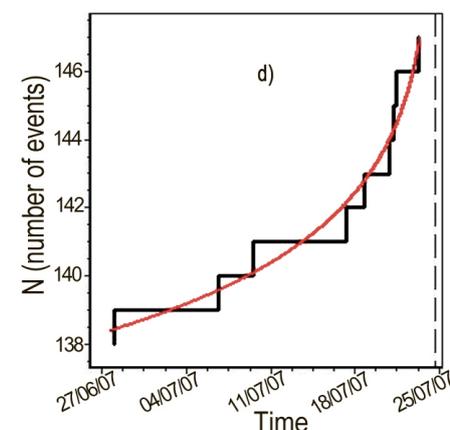
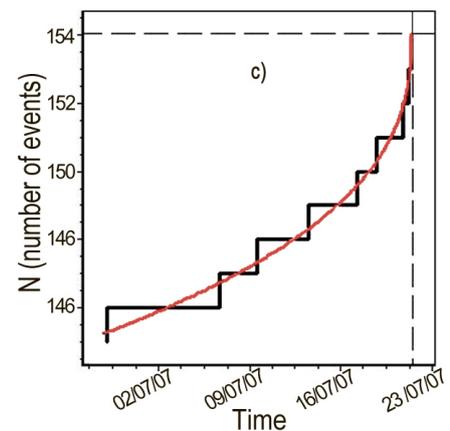
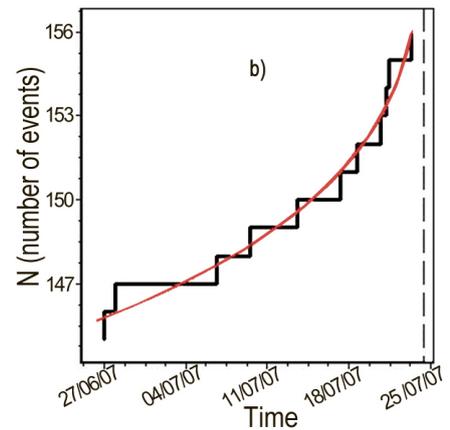
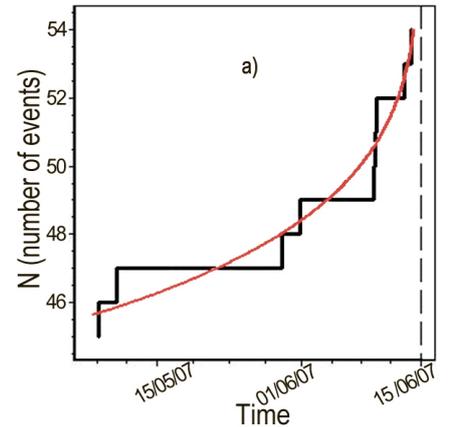
В зонах, включающих в себя эпицентральную область будущего (Невельского) землетрясения или предыдущего Горнозаводского, наблюдаются многочисленные



**Рис. 1.** Карта распределения сейсмических событий в зоне ЗСР с 2004 г. по 08.02.2007 с указанием расчетных областей для метода СРП. Красный круг – эпицентр Невельского ЗЛТ, зеленый – эпицентр Горнозаводского ЗЛТ. Треугольники – сеть автономных полевых станций юга о. Сахалин по состоянию на 2007 г. Разломы: 1 – Западно-Сахалинский; 2 – Центрально-Сахалинский; 3 – Сусунайский [Харахинов, 2010].



**Рис. 2.** Слева – активность в зоне 46.7 N, 142.0 E ( $R = 40$  км) с указанием области афтершоковой релаксации после Горнозаводского землетрясения 2006 г., а также расчетной области для моделирования СРП (с января по июль 2007 г.). Справа – масштабирование расчетной области (стрелками показаны все имеющиеся решения СРП).



**Рис. 3.** Решения для зон с координатами: а) 46.7 N, 141.6 E; б) 46.7 N, 141.8 E; в) 46.7 N, 142.0 E; д) 46.7 N, 142.2 E.

Таблица 1. Результаты расчета СРП для землетрясений, предшествующих землетрясению в Невельске 02.08.2007 ( $t_1$ ) с  $M_w = 6.2$

Координаты расчетных зон (широта $N$ , долгота $E$ )	Дата		Длительность, в днях		Количество СРП
	начала выборки последнего СРП, $t_2$	окончания выборки последнего СРП, $t_3$	СРП, $t_4 = t_3 - t_2$	паузы до главного толчка после получения решения, $t_5 = t_1 - t_3$	
46.1 N, 141.6 E	–	–	–	–	–
46.1 N, 141.8 E	10.04.2007	05.05.2007	24	89	1
	26.02.2007	02.05.2007	65	92	1
46.1 N, 142.0 E	31.05.2007	05.05.2007	34	89	1
	24.02.2007	02.05.2007	67	92	1
46.1 N, 142.2 E	24.02.2007	03.05.2007	65	91	1
	24.02.2007	02.05.2007	67	92	1
46.3 N, 141.6 E	19.04.2007	14.06.2007	55	49	2
	08.05.2007	14.06.2007	37	49	3
46.3 N, 141.8 E	06.07.2007	29.07.2007	22	4	7
	06.07.2007	27.07.2007	20	6	6
46.3 N, 142.0 E	06.07.2007	28.07.2007	21	5	6
	06.07.2007	26.07.2007	19	7	7
46.3 N, 142.2 E	27.06.2007	27.07.2007	30	6	6
	06.07.2007	26.07.2007	19	7	8
46.5 N, 141.6 E	08.05.2007	13.06.2007	36	50	2
	08.05.2007	14.06.2007	37	49	2
46.5 N, 141.8 E	27.06.2007	21.07.2007	24	12	6
	06.07.2007	21.07.2007	14	12	6
46.5 N, 142.0 E	27.06.2007	28.07.2007	31	5	7
	06.07.2007	23.07.2007	17	10	7
46.5 N, 142.2 E	27.06.2007	27.07.2007	30	6	6
	27.06.2007	26.07.2007	29	7	7
46.7 N, 141.6 E	08.05.2007	14.06.2007	37	49	2
	08.05.2007	13.06.2007	36	50	3
46.7 N, 141.8 E	27.06.2007	21.07.2007	23	12	7
	27.06.2007	23.07.2007	26	10	8
46.7 N, 142.0 E	27.06.2007	27.07.2007	29	6	7
	27.06.2007	21.07.2007	23	12	7
46.7 N, 142.2 E	27.06.2007	27.07.2007	30	6	7
	27.06.2007	23.07.2007	25	10	6
46.9 N, 141.6 E	20.03.2007	17.04.2007	27	107	2
	20.03.2007	17.04.2007	27	107	2
46.9 N, 141.8 E	29.03.2007	18.04.2007	20	106	2
	20.05.2007	21.07.2007	61	12	3
46.9 N, 142.0 E	09.06.2007	26.07.2007	46	7	4
	23.05.2007	27.06.2007	35	6	4
46.9 N, 142.2 E	20.05.2007	29.07.2007	69	4	3
	09.06.2007	22.07.2007	43	11	2
47.1 N, 141.6 E	29.01.2007	18.04.2007	79	106	1
	18.02.2007	18.04.2007	59	106	1
47.1 N, 141.8 E	02.05.2007	02.07.2007	61	31	3
	12.06.2007	22.07.2007	40	11	2
47.1 N, 142.0 E	02.05.2007	02.07.2007	61	31	2
	20.05.2007	02.07.2007	42	31	2
47.1 N, 142.2 E	02.05.2007	02.07.2007	61	31	2
	25.04.2007	02.07.2007	68	31	2
47.3 N, 141.6 E	–	–	–	–	–
47.3 N, 141.8 E	18.04.2007	02.07.2007	74	31	1
	18.04.2007	02.07.2007	74	31	2
47.3 N, 142.0 E	13.04.2007	22.07.2007	100	11	1
	13.04.2007	22.07.2007	100	11	2
47.3 N, 142.2 E	12.04.2007	22.07.2007	101	11	1
	12.04.2007	22.07.2007	101	11	2

Примечание. Верхняя строка – результаты расчетов для каталога ЗЛТ с магнитудами  $M \leq 3$ , нижняя – для полного каталога ЗЛТ.

(до 8) активизации, определенные в расчете как СРП. Средняя длительность последних перед главным толчком СРП в этих зонах составляет примерно месяц, хотя в краевых зонах (удаленных от эпицентральной области) достигает 100 дней (характерно для зон с низкой активностью).

Характерным параметром СРП, наравне с горизонтальными и вертикальными асимптотами, является показатель  $\alpha$ , определяющий вид кривой – парабола (при  $\alpha < 1$ ), экспонента ( $\alpha = 1$ ), гипербола ( $1 < \alpha < 2$ ), логарифмическая зависимость ( $\alpha = 2$ ), супергипербола (при  $\alpha > 2$ ). Параметр  $\alpha$  для всех решений для обоих каталогов приведен в табл. 2.

В работе [Tikhonov, Rodkin, 2012] точные ретроспективные прогнозы для Невельского и Горнозаводского землетрясений были получены по решениям СРП длительностью 40 и 91 день соответственно, а параметр  $\alpha$  оказался в обоих случаях равен 3.6. Данные табл. 2 указывают на то, что значения параметра варьируют в широких пределах от 1 до 9, однако преобладают значения супергиперболического типа (при  $\alpha > 2$ ). Однако удивительным представляется распределение параметра в эпицентральной области, график активности для которой представлен на рис. 2. Среди 7 активизаций сейсмичности, определенных как саморазвивающиеся процессы, для которых было получено решение, лишь в одном случае зависимость является экспоненциальной (выделено полужирным в табл. 2), а 6 относятся к супергиперболическому типу. И очень важно то, что эта единственная активизация является последней в списке непосредственно перед Невельским землетрясением. На рис. 2 видно, что предыдущие шесть активизаций имеют очень резкие фронты, а последняя нарастает плавно.

Использование полного каталога событий (без ограничений) для некоторых зон увеличило количество СРП (ложные тревоги в задаче поиска форшоковой активности), а в распределении параметра  $\alpha$  существенных изменений не произошло (табл. 2), что приводит к заключению о приоритетности использования в работе выборки слабых сейсмических событий.

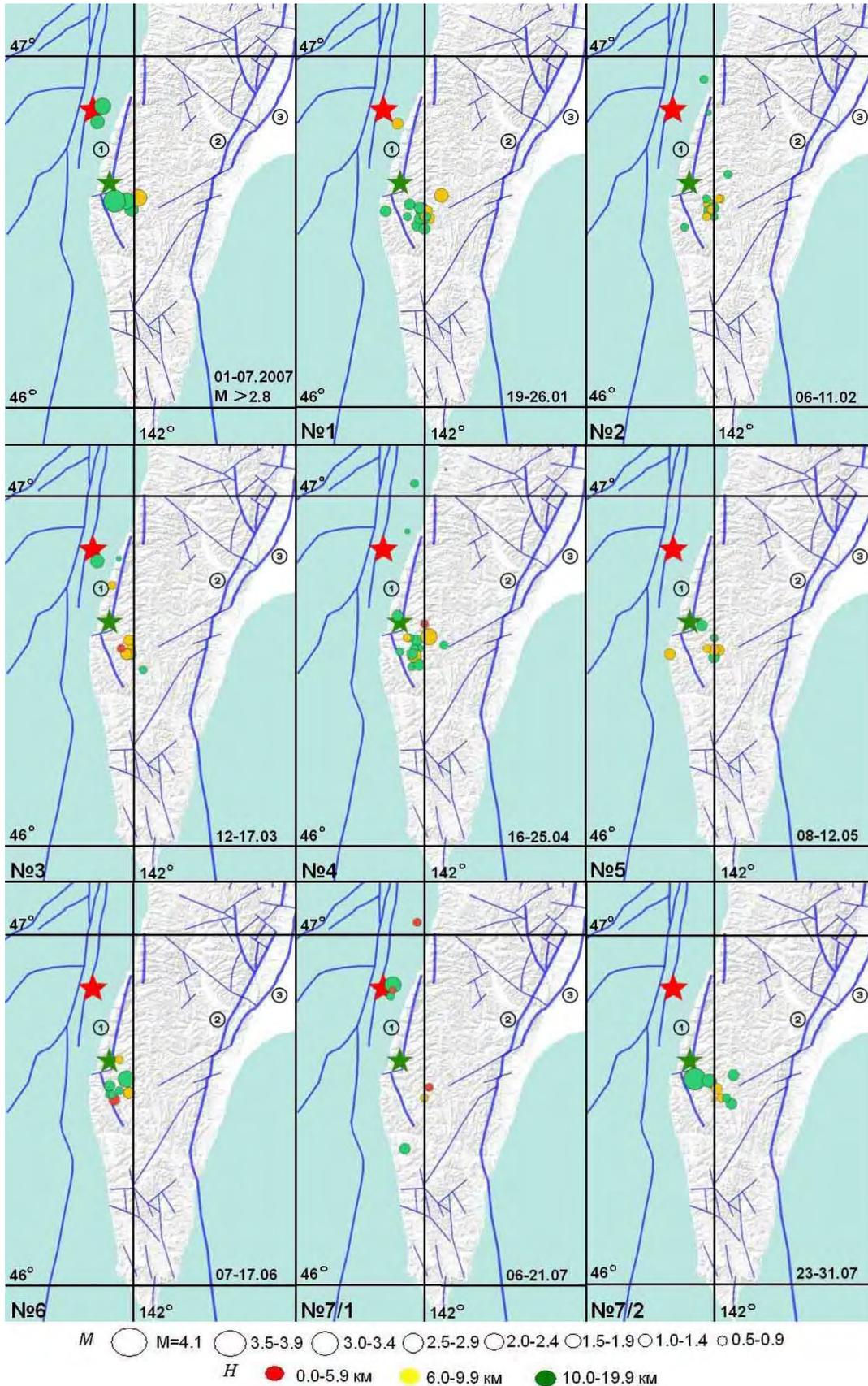
На картах рассматриваемого региона (рис. 4) показаны землетрясения, произошедшие в те периоды времени, для которых появлялись решения по СРП. Для выделения сейсмических событий использовался каталог с января по июль 2007 г., т.е. со времени окончания релаксационного процесса после Горнозаводского ЗЛТ 17.08.2006 г. ( $M = 5.6$ ).

Выборка событий соответствует области с наибольшим количеством установленных саморазвивающихся процессов, т.е. области с центром в точке с координатами 46.7 N, 142.0 E и  $R = 40$  км. На приведенных картах видно, что все шесть (№ 1 – № 6) активизаций в период с января по июнь 2007 г. в основном представлены землетрясениями в эпицентральной зоне Горнозаводского ЗЛТ, что может характеризовать его афтершоковую активность. Однако параллельно с ней непосредственно в районе Западно-Сахалинского разлома в северо-западном направлении от эпицентра Горнозаводского ЗЛТ также развивается некоторая активность. Эта область представлена в основном небольшим количеством событий, однако примечательно, что в других областях в пределах данной 40-км выборки землетрясений не наблюдается вовсе. Отмечается и некоторая связь между этими двумя зонами активизации (в пределах СРП). Так, для СРП № 3, который реализовался с 12 по 17 марта, первые три события с  $M \leq 2.0$  произошли с 12 по 13 марта в первой области, событие 14 марта с  $M = 2.8$  произошло в эпицентре будущего Невельского землетрясения во второй области, а затем эти две зоны активизировались попеременно. Такие же примеры можно увидеть и для других СРП. Особняком стоят СРП № 5 и № 6, которые реализованы без проявлений активности второй области. Такое затишье будущего очага совпадает с появлением аномалии LURR (в мае 2007 г.) [Закупин, 2016; Закупин и др., 2018]. Метод LURR опирается на анализ каталога сейсмических событий и выделение периода, когда сейсмичность в терминологии теории развития сейсмического очага переходит от случайного накопления повреждений (диффуз-

Таблица 2. Значения  $\alpha$  для полученных решений СРП

Координаты расчетных зон	Кол-во СРП	Параметр $\alpha$								
46.1N 141.6E	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
46.1N 141.8E	1	2,0	–	–	–	–	–	–	–	–
	1	2,8	–	–	–	–	–	–	–	–
46.1N 142.0E	1	2,5	–	–	–	–	–	–	–	–
	1	3,0	–	–	–	–	–	–	–	–
46.1N 142.2E	1	2,7	–	–	–	–	–	–	–	–
	1	3,1	–	–	–	–	–	–	–	–
46.3N 141.6E	2	3,3	2,7	–	–	–	–	–	–	–
	3	3,2	3,9	2,4	–	–	–	–	–	–
46.3N 141.8E	7	3,0	2,5	5,0	2,4	3,1	2,9	3,0	–	–
	6	2,3	2,9	2,7	3,7	3,6	3,7	–	–	–
46.3N 142.0E	6	2,4	2,6	2,3	4,5	3,7	3,0	–	–	–
	7	3,0	5,0	2,0	2,9	4,3	4,5	4,1	–	–
46.3N 142.2E	6	1,8	2,3	2,3	2,6	3,7	3,3	–	–	–
	8	2,3	2,2	2,3	2,9	4,5	5,8	5,7	4,1	–
46.5N 141.6E	2	2,9	2,1	–	–	–	–	–	–	–
	2	5,9	2,1	–	–	–	–	–	–	–
46.5N 141.8E	6	2,2	2,8	2,5	3,0	3,0	2,9	–	–	–
	6	3,0	3,3	4,1	2,2	4,0	2,6	–	–	–
46.5N 142.0E	7	1,9	2,8	2,7	2,7	3,3	2,9	2,1	–	–
	7	2,2	2,6	3,5	4,1	3,1	3,8	2,4	–	–
46.5N142.2E	6	2,4	2,7	2,0	5,8	3,2	2,8	–	–	–
	7	2,6	3,3	5,1	4,2	3,2	3,1	3,2	–	–
46.7N 141.6E	2	3,1	2,2	–	–	–	–	–	–	–
	3	2,5	2,6	2,2	–	–	–	–	–	–
46.7N 141.8E	7	3,1	2,0	2,1	2,1	3,4	4,2	2,8	–	–
	8	3,1	2,9	2,1	4,1	4,4	2,9	3,2	2,4	–
46.7N 142.0E	7	3,1	2,0	2,2	3,4	4,2	3,6	<b>1,0</b>	–	–
	7	3,4	2,9	4,4	4,1	3,4	3,1	2,7	–	–
46.7N 142.2E	7	3,1	2,8	4,4	2,6	4,7	3,6	2,8	–	–
	6	3,1	3,2	4,1	3,1	3,6	2,0	–	–	–
46.9N 141.6E	2	3,5	3,8	–	–	–	–	–	–	–
	2	4,9	3,8	–	–	–	–	–	–	–
46.9N 141.8E	2	2,7	2,7	–	–	–	–	–	–	–
	3	4,2	3,3	4,8	–	–	–	–	–	–
46.9N 142.0E	4	3,0	3,2	3,2	3,4	–	–	–	–	–
	4	2,7	3,4	2,9	4,6	–	–	–	–	–
46.9N 142.2E	3	3,2	3,0	3,7	–	–	–	–	–	–
	2	3,5	2,5	–	–	–	–	–	–	–
47.1N 141.6E	1	4,2	–	–	–	–	–	–	–	–
	1	3,2	–	–	–	–	–	–	–	–
47.1N 141.8E	3	2,1	2,8	3,5	–	–	–	–	–	–
	2	2,1	2,9	–	–	–	–	–	–	–
47.1N 142.0E	2	2,2	3,5	–	–	–	–	–	–	–
	2	2,2	4,0	–	–	–	–	–	–	–
47.1N 142.2E	2	2,9	3,2	–	–	–	–	–	–	–
	2	2,9	3,4	–	–	–	–	–	–	–
47.3N 141.6E	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
47.3N 141.8E	1	4,4	–	–	–	–	–	–	–	–
	2	1,8	3,6	–	–	–	–	–	–	–
47.3N 142.0E	1	8,9	–	–	–	–	–	–	–	–
	2	2,0	8,9	–	–	–	–	–	–	–
47.3N 142.2E	1	6,6	–	–	–	–	–	–	–	–
	2	1,8	6,6	–	–	–	–	–	–	–

Примечание. Верхняя строка – значения параметра  $\alpha$  для каталога ЗЛТ с магнитудами  $M \leq 3$ , нижняя – для полного каталога ЗЛТ.



**Рис. 4.** Эпицентры землетрясений, произошедших в периоды активизаций (СРП). Красная звездочка – эпицентр Невельского землетрясения, зеленая – Горнозаводского. Синие линии – разломы: 1 – Западно-Сахалинский; 2 – Центрально-Сахалинский; 3 – Сусунайский [Харахинов, 2010].

ного) к детерминированному накоплению. Определенность состоит в том, что на этой стадии подготовлен ряд областей с высоким уровнем напряжений, в которых готовы развиваться объединения дефектов более высокого ранга (укрупнение), а они в дальнейшем сформируют магистральный разрыв (сильное землетрясение). Именно поэтому данный метод опирается на анализ землетрясений среднего уровня (по Сахалинскому каталогу диапазон определен с магнитудами от 3.3 до 5). Переход очага в такую стадию означает рост параметра LURR, который рассчитывается как отношение отклика среды на нагрузку к разгрузке. Компонента приливных напряжений в тензоре для площадки, где расположен слип-вектор, для каждого ЗЛТ является индикатором нагрузки/разгрузки. Градиент этой компоненты (нагрузка или разгрузка) определяется моментом достижения максимальных значений фактора Кулона.

Для Невельского землетрясения аномалия LURR была обнаружена ретроспективно наряду с другими ЗЛТ Сахалина [Закупин, 2016; Закупин и др., 2018], однако с наилучшим результатом по времени ожидания события – всего около 3 мес. Во взаимосвязи с результатами этой работы после среднесрочного прогнозного признака LURR остаются только 6-я и 7-я активизации (отсечены 5 активизаций СРП, не являющиеся форшоковыми процессами). В июле 2007 г. произошла реализация последнего СРП (с аномальным для таблицы решений параметром  $\alpha$  экспоненциального типа). Началась она равномерно распределенными с севера на юг сейсмическими событиями, группирующимися вблизи Западно-Сахалинского разлома, среди которых были два сильных события во второй области ( $M = 3.1$ ,  $M = 2.4$ ), а закончилась событием в первой области с  $M = 4.1$  с серией слабых афтершоков. Процесс завершился за два дня до Невельского землетрясения.

Полученные результаты указывают на ограниченность явных признаков, по которым можно выделить последний СРП. Параметр  $\alpha$  для последнего СРП был близок к единице и значительно отличался от остальных, а поскольку отмечено, что активизации наиболее близки зависимости

гиперболического типа (от 1 до 1.5) [Малышев, 2019], то результат достаточно неожиданный. Интересен и тот факт, что затишье очаговой области, в которой впоследствии возникает землетрясение, по времени совпадает с аномалией LURR (май 2007 г.), а предвестником «правильного» СРП могут быть умеренные события в будущем очаге, которые происходят в процессе активизации или в рядом расположенных активных зонах. Это показывает возможность использовать метод СРП как инструмент анализа постпредвестникового периода LURR.

Учитывая высокую вовлеченность в представленные саморазвивающиеся процессы событий в области очага Горнозаводского ЗЛТ (рис. 4), проведем декластеризацию землетрясений каталога методом, изложенным в [Смирнов, 1997]. Начальный каталог, состоявший из 242 событий (с января по конец июля 2007 г.), соответствующий зоне, показанной на рис. 1, после декластеризации сократился до 114 событий. Сильнее процесс отбраковки сказался на выделенной нами для расчета области (координаты 46.7 N, 142.0 E и  $R = 40$  км.), где получено максимальное количество СРП. В ней из 163 событий осталось 36.

На рис. 5 отчетливо выделяются 2 процесса, они продолжительны (несколько месяцев), а последний из них впервые отмечается ретроспективно 20 июля 2007 г., после чего события 20–29 июля дополнительно генерируют сильный скачок активности (рис. 5) и происходит «залипание» прогнозной оценки по времени.

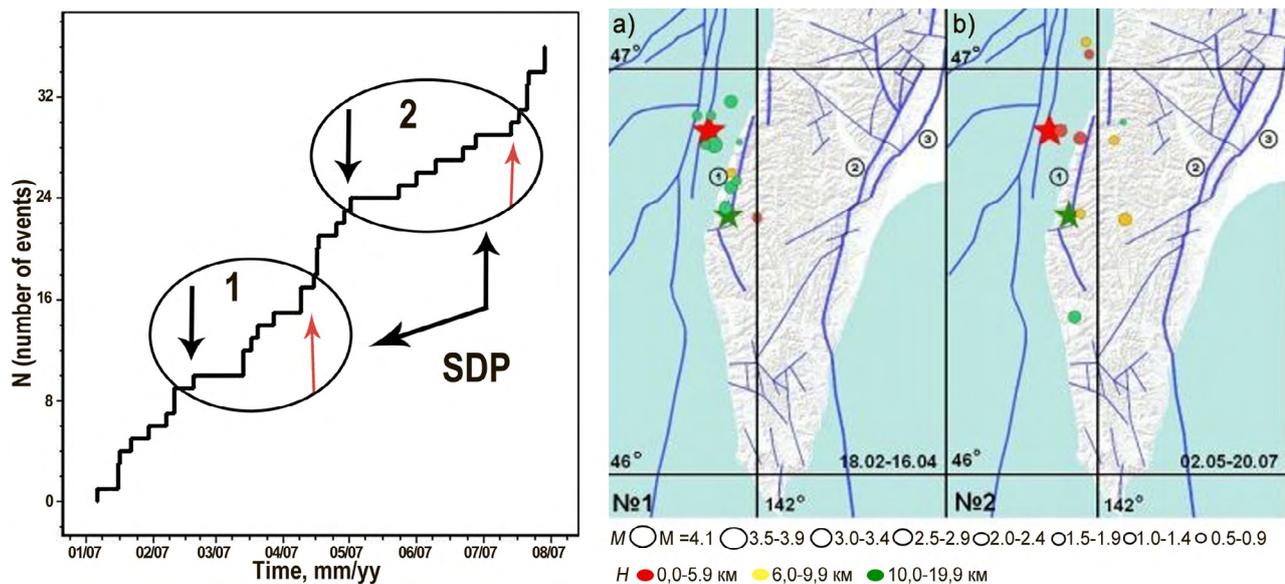
Итак, ложным предвестником оказался первый из двух процессов (после него не было землетрясения), и это хорошо – ведь до отбраковки афтершоков таковых (ложных предвестников СРП) было шесть. В приведенном случае возникает тривиальный вопрос – есть ли различие между первой активизацией (ложным предвестником) и второй, сразу после которой и произошло Невельское землетрясение. И если да, то как эти различия можно применять для отсека ложных тревог в реальном прогнозе. Расчет показал, что параметр  $\alpha$  в первом случае равен 3.19, а во втором 3.71. Это согласуется с

работой [Tikhonov, Rodkin, 2012], где были такие же значения, и здесь различий для нас не наблюдается. Первый СРП закончился в конце апреля 2007 г., а второй начался в мае 2007 г., и это совпадает с появлением предвестника по методу LURR. В первой части работы (использовали полный каталог событий) для отсеки ложных СРП был предложен предвестник LURR, в результате чего из семи активизаций остались только две. В данном случае (с проведением декластеризации) у нас два СРП на весь рассматриваемый период, а после предвестника LURR всего один. Мы пришли к выводу, что для данного примера (Невельского ЗЛТ) декластеризация существенно улучшает результат. Она минимизирует неопределенность при анализе саморазвивающихся процессов, этот результат совпадает с результатом [Tikhonov, Rodkin, 2012]. Однако мы также хорошо понимаем и другую сторону данного вопроса – этот случай был весьма удобен для отработки алгоритма декластеризации, так как времени от основного толчка (Горнозаводское ЗЛТ) прошло немного и больших ошибок алгоритм не допустил. Если же, например, последнее сильное ЗЛТ произошло в области через 5 и более лет после основного ЗЛТ, различные алгоритмы декластеризации могут давать поразительно различные

результаты, и тем самым будут усугубляться ошибки в оценках СРП. В таких неоднозначных случаях очистку каталога от афтершоков лучше не проводить и ограничиться данными по вариациям LURR в рассматриваемой области. Параметр LURR, эффективность которого для Сахалина может считаться убедительной [Закупин и др., 2018], рекомендуется использовать как временной порог для выявления активизаций СРП, могущих стать форшоковыми (предвестниками сильного землетрясения).

### Заключение

В работе предложен подход для объективной оценки результатов моделирования методом саморазвивающихся процессов, а также набор условий для проведения независимых от субъективных оценок расчетов. И хотя в данной работе прогнозы в реальном времени не представлены, очевидно, что, при некотором снижении точности прогноза и появлении дополнительных ложных тревог, предложенный подход потенциально можно использовать не только ретроспективно. Результаты получены для Невельского землетрясения 2007 г. на о. Сахалин. Показано, что за три месяца до землетрясения в Невельске в краевых зонах (удаленных от эпицентра) были зафиксированы сейсмические последователь-



**Рис. 5.** Слева - активность в зоне 46.7 N, 142.0 E ( $R = 40$  км) с указанием (цифрами) решений СРП (self-organized process, SDP), а также начала (черная стрелка) и конца (красная стрелка) расчетной выборки для каждого случая. Справа – эпицентры землетрясений, произошедших в периоды активизаций под номерами 1 (а) и 2 (б). Остальные усл. обозначения см. на рис. 4.

ности, определенные как СРП, при этом они были там единственные, но очень продолжительные (по причине низкой активности и, соответственно, более длительного периода для охвата исследуемых событий в выборке). Такая же продолжительность достигается и в зонах, близких к эпицентру, после удаления афтершоков из каталога (декластеризации). До проведения декластеризации сделано заключение о значительном влиянии на расчеты процесса релаксации в очаге Горнозаводского ЗЛТ, поэтому в зонах, близких к будущему эпицентру, количество активизаций на периоде в 8 мес. достигает восьми. При этом по времени они очень короткие, а время ожидания перед последним СРП всего несколько дней.

Анализ параметров, определяющих характер саморазвивающегося процесса (для недекластеризованного каталога), показал, что в единственном случае вид аппроксимирующей кривой близок к экспоненциальному типу (нехарактерному для СРП), и этот случай относится к последней активизации в эпицентральной области (параметр  $\alpha$  меньше 2). При проведении декластеризации появляются более продолжительные последовательности, для которых получено решение. Они представлены небольшим количеством событий, а значение  $\alpha$  превышает 3 и согласуется с данными работ И.Н. Тихонова.

Распределение сейсмических событий в период развития выявленных последовательностей свидетельствует о формировании очага Невельского землетрясения уже с января 2007 г. Отмечено, что ближе к моменту главного толчка в очаге появляются события большей магнитуды, а с появлением признака LURR наблюдается период сейсмического затишья.

Показано, что в плане количества активизаций расчеты для полного каталога событий и каталога слабой сейсмичности (магнитудами  $M \leq 3$ ) практически идентичны. В то же время распределение параметра  $\alpha$ , определяющего характер кривой, значительно различается для этих двух выборок. При рассмотрении различий в значениях  $\alpha$  однозначных выводов сделать нельзя (разве что для полного каталога вообще нет экспоненциального типа), однако из соображений

снижения общего количества активизаций предпочтительней использовать каталог для слабых событий.

Независимо от существования предвестника по методу LURR, значительно сокращает количество СРП (с 7 до 2) предварительная декластеризация каталога сейсмических событий, что проверено на эпицентральной зоне Невельского землетрясения. Это говорит о целесообразности данной процедуры для зон, где сравнительно недавно (в данном случае в пределах одного года) происходили сильные ЗЛТ, формирующие длительные афтершоковые последовательности.

#### Список литературы

1. Завьялов А.Д. *Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация*. М.: Наука, 2006. 254 с.
2. Закупин А.С. Программный комплекс для анализа неустойчивости сейсмического процесса // *Геоинформатика*. 2016. № 1. С. 34–43.
3. Закупин А.С., Левин Ю.Н., Богинская Н.В., Жердева О.А. Развитие методов среднесрочного прогноза на примере Оморского землетрясения на Сахалине ( $M_w=5.8$ , 14 августа 2016 года) // *Геология и геофизика*. 2018. Т. 59, № 11. С. 1904–1911. doi:10.15372/GiG20181112 [Zakupin A.S., Levin Yu.N., Boginskaya N.V., Zherdeva O.A. Development of medium-term prediction methods: A case study of the August 14, 2016 Onor ( $M_w = 5.8$ ) earthquake on Sakhalin. *Russian Geology and Geophysics*. 59(11): 1526–1532. doi.org/10.1016/j.rgg.2018.10.012]
4. Зубков С.И. *Предвестники землетрясений*. М.: ОИФЗ РАН, 2002. 140 с.
5. Левин Б.В., Ким Ч.У., Соловьев В.Н. Оценка сейсмической опасности и результаты детального сейсмического районирования для городов о. Сахалин = Levin B.V., Chun Un Kim, Solovjev V.N. Seismic hazard estimate and results of detailed seismic zoning for the cities of Sakhalin Island // *Тихоокеанская геология*. 2012. Т. 31, № 5. С. 93–103.
6. Малышев А.И. Динамика саморазвивающихся процессов // *Вулканология и сейсмология*. 1991. № 4. С. 61–72.
7. Малышев А.И. Прогнозируемость сейсмического потока и сильных землетрясений Камчатки в 1962–2014 гг. // *Вулканология и сейсмология*. 2019. № 1. С. 52–66. [Malyshev A.I. The predictability of seismicity and large earthquakes: Kamchatka 1962 to 2014. *J. of Volcanology and Seismology*. 2019, 13(1): 42–55]. doi.org/10.31857/s0205-96142019152-66
8. Малышев А.И., Малышева Л.К. Прогнозируемость потока сейсмической энергии северо-западного обрамления Тихого океана по данным каталога

- USGS = Malyshev A.I., Malysheva L.K. Predictability of seismic energy rate in northwest frame of Pacific Ocean on the base of USGS catalogue // *Геосистемы переходных зон*. 2018. Т. 2, № 3. С. 141–153. doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.141-153
9. Малышев А.И., Тихонов И.Н. Нелинейные закономерности развития сейсмического процесса во времени // *Физика Земли*. 2007. № 6. С. 37–51.
10. Матвиенко Ю.Д. Применение методики М8 на Камчатке: успешный заблаговременный прогноз землетрясения 5 декабря 1997 г. // *Вулканология и сейсмология*. 1998. № 6. С. 27–36.
11. Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Целевой подход к проблеме идентификации афтершоков // *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии*. М.: ОИФЗ РАН, 1993. Вып. 1. С. 62–69.
12. Рождественский В.С., Сапрыгин С.М. Активные разломы и сейсмичность на Южном Сахалине // *Тихоокеанская геология*. 1999. № 6. С. 59–70.
13. Смирнов В.Б. Опыт оценки представительности данных каталогов землетрясений // *Вулканология и сейсмология*. 1997. № 4. С. 93–105.
14. Соболев Г.А. Стадии подготовки сильных камчатских землетрясений // *Вулканология и сейсмология*. 1999. № 4–5. С. 63–72.
15. Тихонов И.Н. Методы анализа каталогов землетрясений для целей средне- и краткосрочного прогнозов сильных сейсмических событий. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 214 с.
16. Тихонов И.Н. Прогноз сильного землетрясения на юго-западном шельфе острова Сахалин и его реализация в результате Невельского землетрясения 2 августа 2007 года // *Тихоокеанская геология*. 2009. Т. 28, № 5. С. 22–29.
17. Тихонов И.Н., Ким Ч.У. Успешный прогноз Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. (MLH = 6.2) на юге о-ва Сахалин // *Доклады Академии наук*. 2008. Т. 420, № 4. С. 532–536.
18. Тихонов И.Н., Левин Б.В. Прогноз сильных землетрясений Сахалинской области: история, результаты и перспективы // *Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всерос. науч. конф. с международным участием, 26–31 мая 2015, Южно-Сахалинск*. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 41–45.
19. Тихонов И.Н., Михайлов В.И., Малышев А.И. Моделирование последовательностей землетрясений юга Сахалина, предвещающих сильные толчки, с целью краткосрочного прогноза времени их возникновения // *Тихоокеанская геология*. 2017. Т. 36, № 1. С. 5–14. [Tikhonov I.N., Mikhaylov V.I., Malyshev A.I. Modeling the Southern Sakhalin earthquake sequences preceding strong shocks for short-term prediction of their origin time. *Russian J. of Pacific Geology*, 2017, 11(1): 1–10. doi.org/10.1134/s1819714017010092]
20. Харахинов В.В. *Нефтегазовая геология Сахалинского региона*. М.: Научный мир, 2010. 275 с.
21. Arellano-Baeza A.A., Zverev A.T., Malinnikov V.A. Study of changes in the leniament structure? Caused by earthquakes in South America by applying the leniament analysis to the Aster (Terra) satellite data // *Advances in Space Research*. 2006. Vol. 37. P. 690–697. doi.org/10.1016/j.asr.2005.07.068
22. Geller R.J. Earthquake prediction: A critical review // *Geophysical J. International*. 1997. Vol. 131(3). P. 425–450. doi.org/10.1111/j.1365-246x.1997.tb06588.x
23. Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. Earthquakes cannot be predicted // *Science*. 1997. Vol. 275(5306). P. 1616–1619. doi.org/10.1126/science.275.5306.1616
24. Hamilton R.M. The President's Page: Earthquake prediction and public reaction [Guest Editorial] // *EOS, Transactions American Geophysical Union*. 1974. Vol. 55(8). P. 739–742. doi.org/10.1029/eo055i008p00739
25. Kagan Y. Seismic moment-frequency relation for shallow earthquakes: Regional comparison // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 1997. Vol. 102(B2). P. 2835–2852. doi.org/10.1029/96jb03386
26. Swinbanks D. Trying to shake Japan's faith in forecasts // *Nature*. 1992. Vol. 356. P. 464–465. https://doi.org/10.1038/356464a0
27. Tikhonov I.N., Kim Ch.U. Confirmed prediction of the 2 August 2007 Mw 6.2 Nevelsk earthquake (Sakhalin Island, Russia) // *Tectonophysics*. 2010. Vol. 485 (1–4). P. 85–93. doi.org/10.1016/j.tecto.2009.12.002
28. Tikhonov I.N., Rodkin M.V. Earthquake research and analysis // Sebastiano D'Amico, Dr (ed.). *Statistical Studies, Observations and Planning*. Malta: Univ. of Malta, 2012. P. 43–78.
29. Wyss M. Cannot earthquakes be predicted? // *Science*. 1997. Vol. 278(5337). P. 487–488. doi.org/10.1126/science.278.5337.487
30. Wang K., Chen Qi-Fu, Sun Shihong, Wang Andong. Predicting the 1975 Haicheng Earthquake // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2006. Vol. 96(3). P. 757–795. https://doi.org/10.1785/0120050191
31. Zhang G., Fu Z. Some features of medium and short-term anomalies before great earthquake // *Earthquakes Prediction: An International Review*. 1981. P. 497–509. (Maurice Ewing Series; vol. 4). https://doi.org/10.1029/me004p0497 .

Об авторах

ЗАКУПИН Александр Сергеевич (ORCID 0000-0003-0593-6417), кандидат физико-математических наук, зам. директора, БОГИНСКАЯ Наталья Владимировна (ORCID 0000-0002-3126-5138), научный сотрудник, АНДРЕЕВА Марина Юрьевна (ORCID 0000-0002-7851-3311), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник – лаборатория сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.

## Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования

© 2019 П. А. Каменев\*<sup>1</sup>, Д. В. Костылев<sup>1,2</sup>, Н. В. Богинская<sup>1</sup>, А. С. Закупин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup>Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия

\*E-mail: p.kamenev@imgg.ru

**Реферат.** В окрестности активного разлома южного Сахалина развернут комплекс для геофизических исследований, представленный сейсмическими станциями (широкополосной и короткопериодными), гидрофоном и сетью регистрации концентрации подпочвенного радона. Создана база данных сейсмологических наблюдений, включающая записи широкополосного и короткопериодных сейсмометров, гидрофона и вариаций объемной активности подпочвенного радона (ОА Rn). Проведена оценка уровня шумов и регистрационных возможностей сейсмического оборудования. Выделена аномалия вариаций ОА Rn после сейсмического события в наблюдаемом регионе. Показана необходимость сейсмологических наблюдений за разработкой Анивских газовых месторождений, находящихся в зоне регистрации развернутого оборудования. В ходе работ осуществляется апробация инновационного оборудования, основанного на молекулярно-электронной технологии.

**Ключевые слова:** сейсмичность, мониторинг, активный разлом, инновационное геофизическое оборудование, геофизические наблюдения, сейсмическое событие.

Для цитирования: Каменев П.А., Костылев Д.В., Богинская Н.В., Закупин А.С. Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования. *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 4. С. 390–402. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.390-402>

## Geophysical surveys in the southern part of the Central Sakhalin Fault based on new integrated network

Pavel A. Kamenev\*<sup>1</sup>, Dmitriy V. Kostylev<sup>1,2</sup>, Natalya V. Boginskaya<sup>1</sup>, Alexander S. Zakupin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>2</sup>Sakhalin Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

\*E-mail: p.kamenev@imgg.ru

**Abstract.** A surveys system involved seismic stations (broadband and short-period), a hydrophone and a network for recording the level of subsurface radon has been deployed in the vicinity of the active fault of southern Sakhalin. A database on these geophysical fields has been created. The noise level and registration capabilities of seismic equipment have been assessed. The anomaly of variations OA Rn of subsurface radon after a seismic event in the observed region is highlighted. It is shown that the deployed geophysical system can control the Aniva gas field located in the registration zone and the seismological monitoring of gas production is proper. During the period of surveys the approbation of the modern, innovative equipment based on molecular-electronic technology is carried out.

**Keywords:** seismicity, monitoring, active fault, innovative geophysical equipment, geophysical observations, seismic event.

For citation: Kamenev P.A., Kostylev D.V., Boginskaya N.V., Zakupin A.S. Geophysical surveys in the southern part of the Central Sakhalin Fault based on new integrated network. *Geosystems of Transition Zones*, 2019, vol. 3, no. 4, pp. 390–402. (In Russian) <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.390-402>

## Введение

Большая часть населения Сахалинской области проживает в непосредственной близости от активного Центрально-Сахалинского разлома (ЦСР), который способен генерировать сильные сейсмические события (рис. 1). В отличие от вероятной области землетрясения (ВОЗ) в северной (пример – Нефтегорское землетрясение) и западной (пример – Невельское землетрясение) частях острова, в этой части прогнозируемая интенсивность на балл ниже, однако за счет более высокой плотности населения выше и степень риска. Дополнительной нагрузкой для напряженно-деформированного состояния данного линеаamenta является длительная эксплуатация Анивских газовых месторождений (АГМ). При этом основное внимание сейсмологов приковано к очаговым областям, где имели место резонансные события наподобие Нефтегорского и Невельского землетрясений. Появились дополнительные основания к анализу напряженно-деформированного состояния структур в районе ЦСР и, как следствие, к развертыванию в начале 2018 г. комплексных геофизических наблюдений в южной части ЦСР силами Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН). Результаты среднесрочного прогноза землетрясений методами LURR и СРП, полученные в ИМГиГ ДВО РАН, указали на наличие потенциальной опасности в окрестности этого сегмента разлома [Закупин, Богинская, 2019]. Актуальность проблемы очевидна, а путь к ее решению определяется комплексированием различных подходов и методов для анализа разнородной геофизической информации.

С целью изучения распределения деформаций и напряжений в процессе подготовки сильного сейсмического события и после его реализации была создана геомеханическая модель южного сегмента ЦСР [Каменев и др., 2019]. Расчет избыточных касательных напряжений, возникающих в рассматриваемой области, показывает, что их максимальная величина концентрируется в зоне разлома. Так, максимальное его зна-

чение 289 МПа соответствует глубине 9 км и постепенно снижается до минимальных значений на свободной поверхности. Результаты моделирования согласуются как с данными распределения очагов землетрясения, так и с инструментальными данными современных приповерхностных деформаций [Прытков, Василенко, 2018]. Работы по математическому моделированию геодинамических процессов могут лишь указать на потенциально опасные области сегмента разлома. Одним из эффективных способов наблюдения за активностью разломов считаются геофизические методы исследования. Отправной точкой по развертыванию геофизических наблюдений стал проект Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) «Исследование триггерных деформационных эффектов по данным о сейсмичности Сахалина с применением сейсмических датчиков нового типа». Этот проект реализуется ИМГиГ ДВО РАН совместно со специалистами Сахалинского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) и Московского физико-технического института (МФТИ).

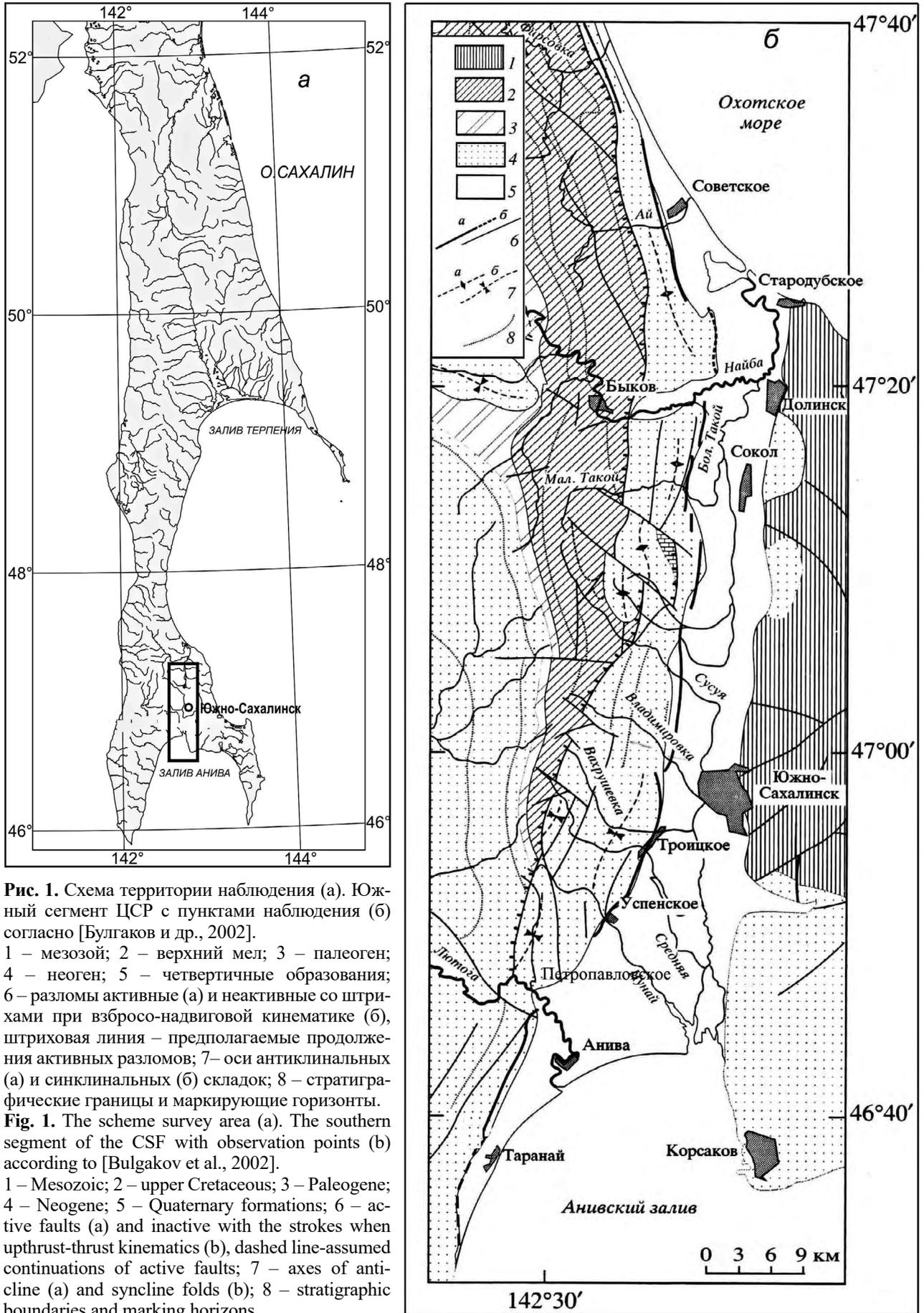
В данной работе показаны первичный этап развертывания геофизического комплекса для непрерывного мониторинга сейсмической активности ЦСР и первые результаты исследований.

## Методики сбора и анализа геофизических данных

### *Обоснование и выбор мест для пунктов наблюдения*

Для обеспечения геофизических исследований в рамках проекта в с. Петропавловское (см. рис. 1) была развернута площадка комплексных геофизических наблюдений. При выборе места для площадки авторы настоящей работы руководствовались несколькими основными соображениями.

Пункт наблюдения имеет развитую инфраструктуру и современную телекоммуникационную сеть, позволяющую непрерывно обеспечивать доступ к оборудованию и регистрируемым данным. Обеспечена круглосуточная охрана оборудования.



**Рис. 1.** Схема территории наблюдения (а). Южный сегмент ЦСР с пунктами наблюдения (б) согласно [Булгаков и др., 2002].  
 1 – мезозой; 2 – верхний мел; 3 – палеоген; 4 – неоген; 5 – четвертичные образования; 6 – разломы активные (а) и неактивные со штрихами при взбросо-надвиговой кинематике (б), штриховая линия – предполагаемые продолжения активных разломов; 7 – оси антиклинальных (а) и синклинальных (б) складок; 8 – стратиграфические границы и маркирующие горизонты.  
**Fig. 1.** The scheme survey area (a). The southern segment of the CSF with observation points (b) according to [Bulgakov et al., 2002].  
 1 – Mesozoic; 2 – upper Cretaceous; 3 – Paleogene; 4 – Neogene; 5 – Quaternary formations; 6 – active faults (a) and inactive with the strokes when upthrust-thrust kinematics (b), dashed line-assumed continuations of active faults; 7 – axes of anticline (a) and syncline folds (b); 8 – stratigraphic boundaries and marking horizons.

Полигон располагается в зоне двух активных разломов – Центрально-Сахалинского (Тымь-Поронайского) и Апрельовского, в зоне которых проживает большая часть населения Сахалинской области (рис. 1). Таким образом, исследования в выбранном месте весьма актуальны для обеспечения безопасности жизнедеятельности населения.

Пункт наблюдения находится на территории, имеющей наибольшую плотность покрытия сейсмическими станциями Геофизической службы РАН на территории Сахалинской области, эти данные необходимы для проведения качественных исследований.

Полигон находится на окраине населенного пункта, что в некоторой степени снижает уровень техногенных шумов.

Сейсмическая активность выбранного сегмента Центрально-Сахалинского разлома исследуется методами LURR и СРП [Закупин, Богинская, 2019; Levin et al., 2018], проведено геомеханическое моделирование данного сегмента [Каменев и др., 2019].

В зоне наблюдения выбранного сегмента разлома находятся Анивские газовые месторождения, которые могут представлять интерес с точки зрения техногенно-индуцированной сейсмичности и воздействия сейсмических событий на динамику добычи.

Кроме оборудования комплексного пункта наблюдения в с. Петропавловское, совместно со специалистами Камчатского филиала Единой геофизической службы РАН (КФ ФИЦ ЕГС РАН) и СФ ФИЦ ЕГС РАН были развернуты пункты наблюдения за уровнем подпочвенного радона в г. Южно-Сахалинск, селах Быков и Ожидаево [Макаров и др., 2018]. Организована временная сеть короткопериодных сейсмических станций в селах Таранай и Петропавловское, осуществляющая мониторинг района Анивских газовых месторождений [Костылев и др., 2018].

### **Характеристика района исследования**

Как отмечено выше, полигон располагается в зоне двух активных разломов – Центрально-Сахалинского (Тымь-Поронайского) и Апрельовского (Троицкого) [Воейкова и др.,

2007; Булгаков и др., 2002; Рождественский, Сапрыгин, 1999], последний в некоторых источниках рассматривается как опережающий Тымь-Поронайский взбросо-надвиг [Кучай, 1987; Мельников, 2002] (рис. 1). Такая геологическая система представляет существенный интерес для наблюдений за ее геодинамической активностью. Из самих названий геологических структур следует, что единого мнения о геометрии (как и названии) разломов не существует. Плоскости сместителей обеих ветвей разлома наклонены на запад под углами 60–80° при выходе на дневную поверхность с постепенным выполаживанием до 20–30° на глубинах 10–15 км. Западная ветвь Центрально-Сахалинского разлома выражена в рельефе в виде уступа высотой до 50–80 м; смещает плиоцен-раннечетвертичную и среднечетвертичную поверхность выравнивания. Вдоль плоскости разлома наблюдается пластичная смазка в виде аргиллитов быковской свиты [Сапрыгин, 2005]. Наиболее детально разломы и тектонические нарушения южной части Сахалина отражены в статье [Рождественский, Сапрыгин, 1999]. В ней показано, что в области, расположенной от 46°40' до 47°15' с.ш., имеет место зона дробления земной коры, отмечены локальные разломы северо-восточного и северо-западного направлений. Ширина этой зоны около 25–30 км, протяженность – около 50 км. Зона вытянута в меридиональном направлении с севера на юг. Ее западная граница условно может быть проведена по долготе 142°20', а восточная по долготе 142°40', что соответствует примерно положению северной части Апрельовского разлома. Именно с ним и связаны в основном очаги землетрясений в этом районе [Злобин, Бобков, 2003]. Это отражается в характере деформаций, измеряемых на поверхности с помощью GPS/ГЛОНАСС. Средняя скорость движения блоков по разлому составляет 0.6 мм/год; современная скорость поднятия Западно-Сахалинских гор 2–4 мм/год [Прытков, Василенко, 2018].

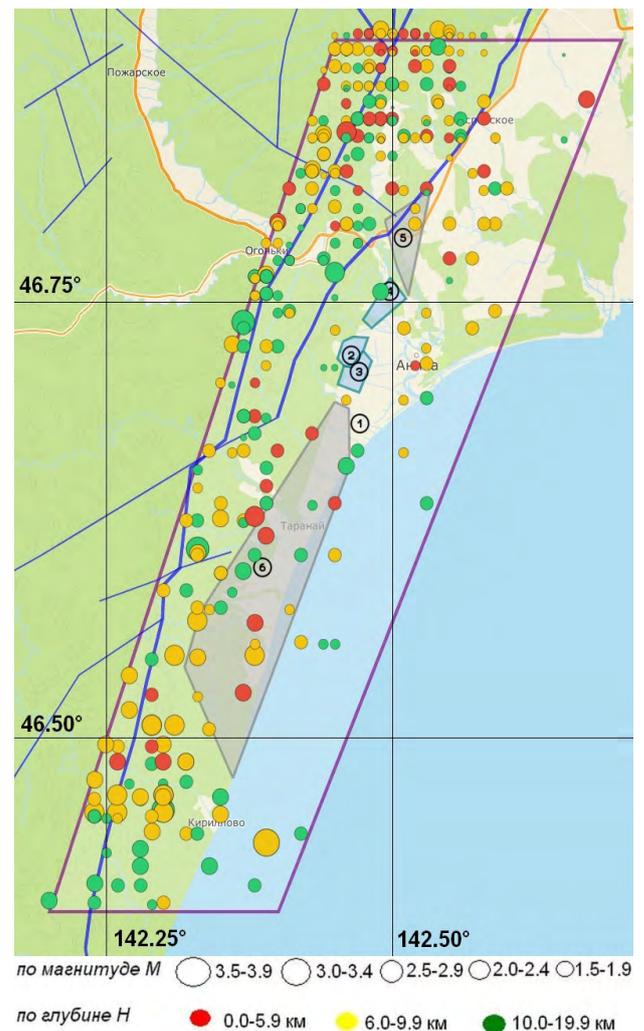
К уникальным геологическим характеристикам района исследования можно отнести грязевой вулканизм Центрально-Сахалинского разлома. К разлому приурочена

система грязевых вулканов – Пугачевские грязевые вулканы, грязевые вулканы Восточный и Южно-Сахалинский [Ершов, 2012; Никитенко и др., 2018]. На территории Сахалинской области Южно-Сахалинский грязевой вулкан является одним из наиболее крупных и активных на сегодняшний день. Поскольку грязевой вулкан представляет собой, по сути, природную флюидодинамическую систему, то вариации напряженно-деформированного состояния или некое воздействие на эту систему будут приводить к ее изменениям. В ряде работ, как зарубежных, так и отечественных, в деятельности грязевых вулканов выявлены предвестники землетрясений [Shakirov et al., 2004; Алиев, 2006; Yang et al., 2006; Chaudhuri et al., 2012]. Сотрудники ИМГиГ ДВО РАН также установили причинно-следственные связи между деятельностью Южно-Сахалинского грязевого вулкана, динамикой вещественного состава его извержений и региональной сейсмичностью [Ершов, 2012]. Таким образом, в зоне разрабатываемых геофизических наблюдений присутствует дополнительный источник геолого-геофизической информации.

Наиболее сильные сейсмические события в зоне разлома таковы (с юга на север): Крильонские 1911, 1912, 1921 гг. ( $M = 4.7-5.1$ ); Анивские 1951 г. ( $M = 5.5$ ) и 1964 г. ( $M = 5.0$ ); Перевальско-Синегорские 1923 и 1924 гг. ( $M = 4.5-4.8$ ); Перевальское 1949 г. ( $M = 5.2$ ) и Найбинское 1928 г. ( $M = 4.9$ ), Такойское 2001 г. ( $M = 5.2$ ). Их эпицентры приурочены преимущественно к районам пересечения Центрально-Сахалинского сбросо-надвига с диагональными разломами [Злобин, Бобков, 2003].

Анивские газовые месторождения приурочены к прибрежной части прогиба зал. Анива [Тютрин и др., 1981]. Тектоническое строение этой части определяется южным окончанием ЦСР и включает в себя Анивскую зону приразломной складчатости. Она представляет собой серию продольных взбросов и взбросо-надвигов западного падения, осложненных поперечными разломами [Тютрин, Дуничев, 1985]. В этой зоне выделяют структуры, представленные на рис. 2. Поисковые работы на месторождении начаты

в 1969, а добыча – в 1997 г. В настоящее время АГМ активно разрабатываются, что способствует их истощению, это отражается как в падениях дебитов скважин, так и, вероятно, в характере индуцированной сейсмичности. На рис. 2 продемонстрированы основные разрабатываемые структуры АГМ и сейсмичность в период с 2003 по 2018 г.



**Рис. 2.** Анивские газовые месторождения (отмечены номерами от 1 до 6) и сейсмичность выделенной зоны в период с 2003 по 2018 г. Структуры наиболее освоённые: 1 – Восточно-Луговская, 2 – Южно-Луговская, 3 – Золоторыбная, 4 – Заречная. Структуры перспективные и разрабатываемые в настоящее время: 5 – Луговская, Петропавловская, 6 – Южно-Таранайская и Бачинская. Кружками отмечены сейсмические события.

**Fig. 2.** Aniva gas fields (numbers 1–6) and seismicity of the selected zone in the period from 2003 to 2018. Structures: 1 – Vostochno-Lugovskaya, 2 – Yuzhno-Lugovskaya, 3 – Zolotorybnaya, 4 – Zarechnaya; the most developed. Structures: 5 – Lugovskaya, Petropavlovskaya, 6 – Yuzhno-Taranayskaya and Bachinskaya; are perspective and under developed now. Circles marked seismic events.

### **Монтаж и запуск аппаратуры наблюдения**

Предварительно было проведено тестирование сейсмических пунктов полигона в с. Петропавловское для определения уровня шумов, а также корректного определения станционных поправок. Для этого в разных местах полигона (на фундаменте в помещении и на грунте) производились двухчасовые записи сейсмического шума с целью определения уровня различных естественных и антропогенных помех (акселерометр CMG-5TDE со встроенным регистратором фирмы Guralp (Великобритания) [Мишаткин и др., 2011; Peterson, 1993]. Для расчета спектральной плотности сейсмических шумов использовался программный комплекс DIMAS (Display, Interactive Manipulation and Analysis of Seismograms) [Дрознин, Дрознина, 2010]. Тестирование показало, что уровень шумов, даже в «полевом» варианте установки, находится практически в пределах допустимых значений и что размещение сейсмических станций на выбранных площадках полигона приемлемо [Kostylev et al., 2019].

Для изучения строения верхней части геологического разреза и детального уточнения состава и свойств почв полигона были проведены совместно с КФ ФИЦ ЕГС РАН сейсморазведочные работы и эманационная съемка в местах размещения оборудования [Макаров и др., 2018].

Началом работы пункта можно считать 10 июня 2018 г., когда была начата регистрация данных после установки молекулярного широкополосного сейсмометра СМЕ-6111 с регистратором NDAS-8226. СМЕ-6111 – высокоточный широкополосный (частотный диапазон 0.016 Гц (60 с) – 50 Гц) сейсмометр, характеризующийся низким собственным шумом, высокой линейностью и широким динамическим диапазоном. Наличие силовой обратной связи гарантирует высокую температурную и временную стабильность параметров [Агафонов и др., 2013]. Регистратор сигналов NDAS-8226 – 24-рядная сейсмическая система сбора данных, преимущественно оптимизированная для автономной регистрации сейсмических дан-

ных в полевых условиях. Систему отличают простота в использовании и надежность в сочетании с высокими техническими характеристиками. Для передачи данных и конфигурирования системы используются USB и Wi-Fi соединения; 32 Гб внутренней памяти позволяют вести длительную регистрацию данных в автономном режиме. Система оснащена высокоточным кварцевым генератором с привязкой к абсолютному времени с помощью GPS/ГЛОНАСС.

24 октября 2018 г. на пункте наблюдений был проведен монтаж прототипа молекулярно-электронного гидрофона, изготовленного (в рамках проекта РФФИ) МФТИ совместно с компанией «Р-Сенсорз» [Авдюхина и др., 2018]. Для монтажа гидрофона на полигоне была построена специальная самообводняющаяся скважина глубиной 3.5 м. Скважина обсажена перфорированной пластиковой трубой 110 мм. Установленный гидрофон представляет собой устройство для измерения давления в акустической волне в жидких и газообразных средах. Гидрофон выполнен с использованием электрохимического преобразователя движения рабочей жидкости в регистрируемый ток, обеспечивающий чувствительность к вариациям давления в полосе частот 0.02–200 Гц с высоким коэффициентом преобразования на уровне не менее 1.5 мВ/Па.

Технология молекулярно-электронного переноса предлагает альтернативу типичным электромеханическим устройствам и предоставляет возможность регистрации сейсмических данных с помощью компактных, надежных, простых в установке приборов. Принципы действия таких приборов основаны на вариациях переноса заряда, обусловленных перемещением электролита в электрохимической ячейке, состоящей из 4 электродов. Ячейка заполнена высококонцентрированным раствором электролита, а между указанными электродами приложена небольшая постоянная разность потенциалов. В этой системе электролит играет роль инерционной массы. Внешнее ускорение вдоль осей датчика приводит электролит

в движение, тем самым изменяя ток между анодом и катодом [Агафонов и др., 2013; Авдюхина и др., 2018]. Более подробно результаты работы инновационного оборудования на Сахалине представлены в [Kostylev et al., 2019].

Для обеспечения удаленного доступа и управления работой регистрирующего оборудования используется 4G модем-маршрутизатор, который позволяет управлять работой системы через Интернет. Модем-маршрутизатор подключается к NDAS-8226 с помощью Wi-Fi-соединения и, значит, не зависит от местоположения регистратора. Питание системы обеспечивается 12-вольтовым источником питания с внешним аккумулятором, что гарантирует работу комплекса в случае отключения электроэнергии. Вся информация сохраняется в базе данных, содержащей записи волновых форм, полученные от сейсмологического оборудования, а также сведения об уровне концентрации подпочвенного радона, атмосферном давлении, температуре воздуха и влажности почвы. Схема комплекса приведена на рис. 3.

С целью мониторинга техногенно-индуцированной сейсмичности АГМ была развернута временная сеть из короткопериодных сейсмостанций в с. Таранай и с. Петропавловское Анивского района, состоящая из регистраторов Дельта-03 и сейсмометра СПВ-3к (рис. 3). В настоящее время данная сеть проходит модернизацию, с увеличением количества станций и обеспечением удаленного доступа к ней.

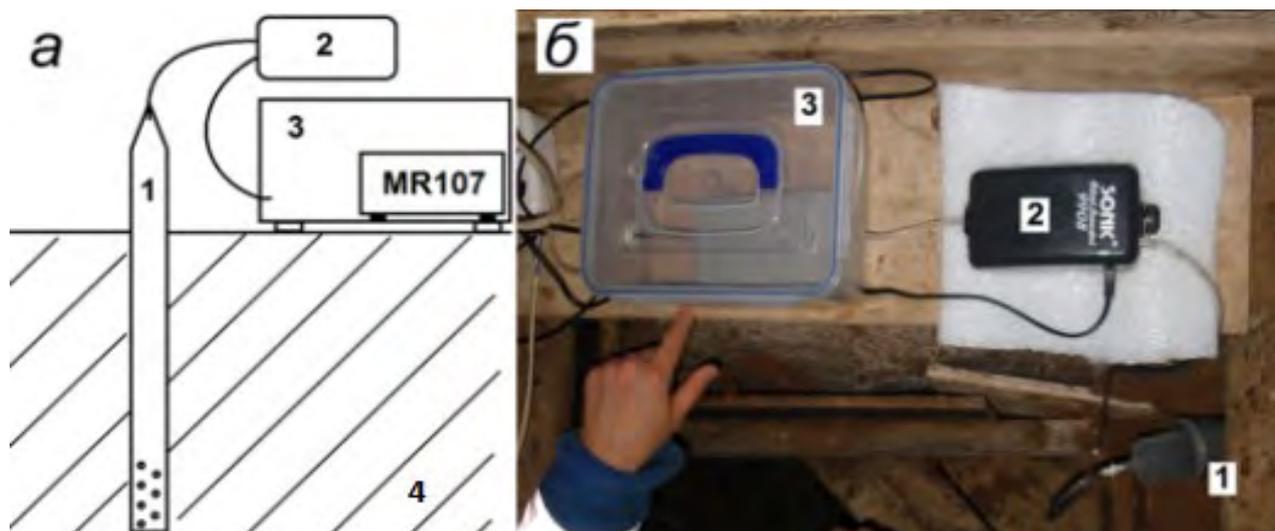
### Пункты мониторинга подпочвенного радона на юге Сахалина

Первые пункты наблюдения в окрестности южного сегмента ЦСР были организованы в 2018 г. благодаря сотрудничеству трех организаций – КФ ФИЦ ЕГС РАН, СФ ФИЦ ЕГС РАН и ИМГиГ ДВО РАН [Makarov et al., 2018]. Были запущены непрерывные наблюдения за уровнем подпочвенного радона в следующих населенных пунктах: г. Южно-Сахалинск, с. Ожидаево, с. Петропавловское. В 2019 г., в тестовом режиме, ИМГиГ ДВО РАН открыл еще один пункт наблюдения – в с. Быков, в ближайшее время планируется запуск аппаратуры наблюдения за подпочвенным радоном в с. Таранай.

Регистрация осуществляется с помощью радиометра RADEX MR107 (ООО «КВАРТАРАД»), предназначенного для оценки эквивалентной равновесной объемной активности радона ( $OA R_n$ ) и дочерних продуктов его изотопов по величине  $OA R_n$  в воздухе жилых и общественных помещений. Для мониторинга уровня подпочвенного радона с помощью прибора MR107 применили метод принудительной конвекции с помощью откачки подпочвенного воздуха из измерительного шпура компрессором в накопительную камеру, где установлен прибор [Уткин, Юрков, 2010; Козлова, Юрков, 2005] (рис. 4). С помощью такой архитектуры оборудования удастся существенно снизить уровень помех, оказывающих влияние на измерения вариаций температуры воздуха, атмосферного давления и влажности почвы [Рудаков, 2009].



Рис. 3. Оборудование пункта геофизических наблюдений в селе Петропавловское.  
Fig. 3. The equipment Petropavlovskoe station of geophysical observations.



**Рис. 4.** Блок-схема (а) и общий вид (б) комплекта для регистрации подпочвенного радона. 1 – перфорированная труба в шпуре; 2 – компрессор; 3 – накопительная камера с прибором MR107; 4 – грунт.

**Fig. 4.** The block diagram (a) and general view (b) of the set for registration of subsurface radon. 1 – perforated pipe in the hole; 2 – compressor; 3 – storage chamber with the sensor MR107; 4 – soil.

### Результаты наблюдений

Сейсмологические наблюдения в с. Петропавловское ведутся в непрерывном режиме. Результаты наблюдений сохраняются в виде архива волновых форм, который используется для дальнейшего анализа. Для оценки регистрации сейсмических событий в районе южной части Центрально-Сахалинского разлома сейсмометром СМЕ-6111, гидрофоном и регистратором сигналов NDAS-8226, установленными в Петропавловском, использован каталог землетрясений по данным локальной сети СФ ФИЦ ЕГС РАН за период 6 месяцев (с 24.10.2018 по 25.04.2019 г.) в квадрате, ограниченном координатами 46.7–47.5° с.ш. и 142.2–142.7° в.д. Каталог включает в себя 66 сейсмических событий с магнитудой от 1.8 до 3.8. Для временного интервала каждого сейсмического события из архива волновых форм регистратора сейсмических сигналов NDAS-8226 были подготовлены соответствующие записи, их обработку проводили в программном комплексе DIMAS [Дрознин, Дрознина, 2010], разработанном в КФ ФИЦ ЕГС РАН. Для удобства обработки сейсмологических материалов применялись различные виды фильтров.

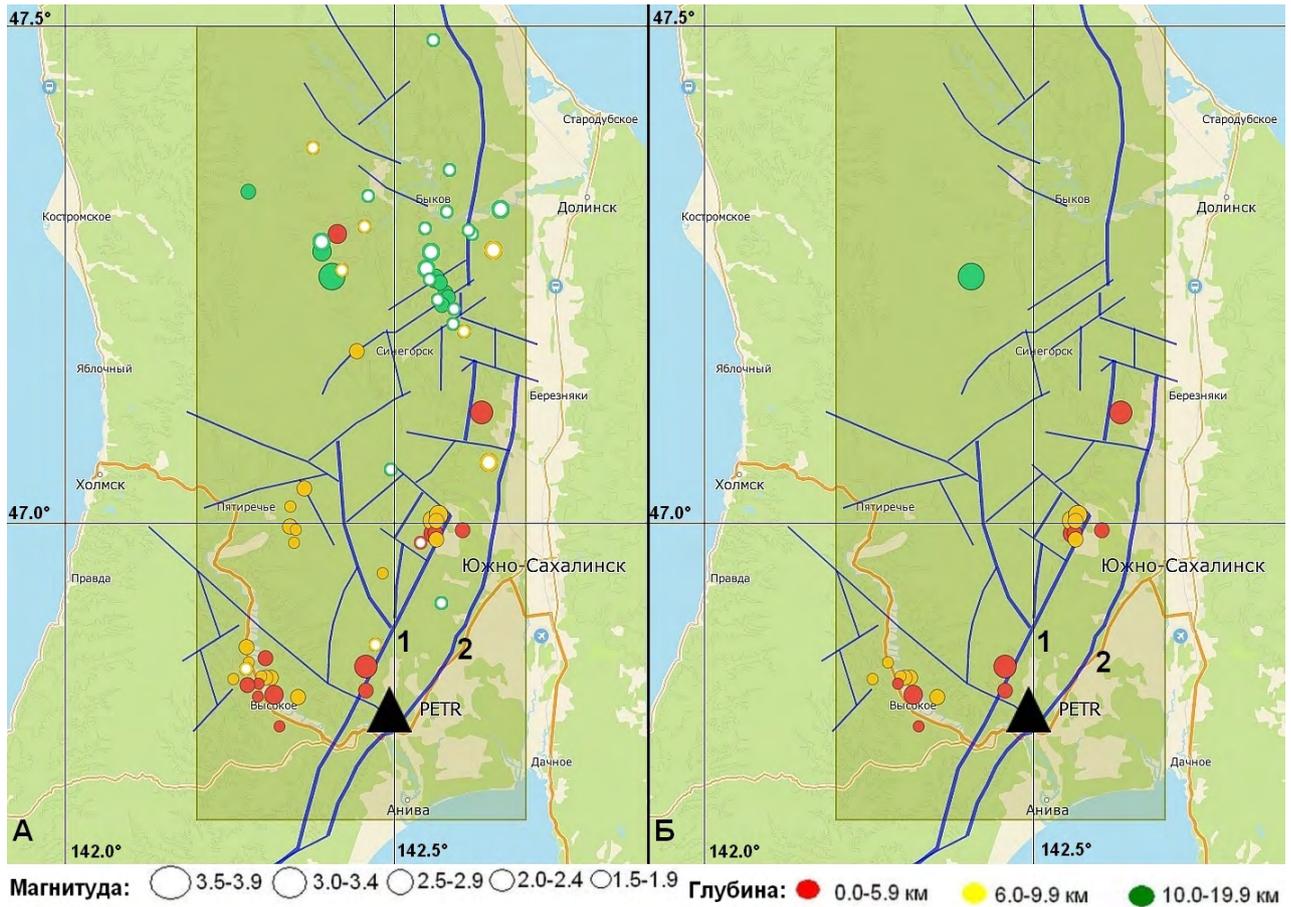
В результате установлено, что из 66 землетрясений четкая запись вступлений имеется

у 39 событий для волновых форм сейсмометра СМЕ-6111 и у 18 событий, зарегистрированных гидрофоном.

Результаты анализа регистрационных возможностей комплектов оборудования СМЕ-6111 – NDAS-8226 и гидрофон – NDAS-8226 (Петропавловское) приведены на рис. 5, показывающем пространственное распределение событий, зафиксированных комплексом оборудования.

На основе каталогов землетрясений СФ ФИЦ ЕГС РАН была построена карта распределения сейсмических событий в окрестности АГМ в период с 2003 по 2018 г. Данный временной интервал совпадает с наиболее интенсивной стадией освоения месторождений.

Из рис. 2 следует, что в зоне разрабатываемых структур АГМ (блоки 1, 2, 3, 4) за 15 лет в период с 2003 по 2018 г. сейсмических событий практически не наблюдалось. Хотя наибольшее число землетрясений приурочено к ЦСР, тем не менее на северной и южной границе месторождений, на том же удалении от разлома, как и в случае с блоками 1, 2, 3 и 4, зафиксировано гораздо большее число событий. Структуры 1, 2, 3 и 4 разрабатываются достаточно давно и являются зрелыми. По всей видимости, добыча оказывает влияние на напряженно-деформированное со-



**Рис. 5.** Регистрационные возможности комплектов оборудования пункта наблюдения Петропавловское. А – распределение всех сейсмических событий в выбранном районе за указанный период времени. Залитыми кружочками показаны события, уверенно зарегистрированные комплектом SME-6111 – NDAS-8226 (А) и комплектом гидрофон – NDAS-8226 (Б). Разломы: 1 – Центрально-Сахалинский, 2 – Апреловский.

**Fig. 5.** Registration possibilities of the equipment for observation station Petropavlovskoe. 1 – Central Sakhalin Fault, 2 – Aprelovskiy fault.

стояние таким образом, что максимальные напряжения концентрируются на окраинах структур, что и выражается в более высоком уровне сейсмичности на границах месторождения, хотя этот уровень не так высок, как непосредственно на ЦСР. Таким образом, мониторинг АГМ представляет собой перспективную и интересную задачу в рамках наблюдений за геодинамической активностью южного сегмента ЦСР.

В период работы системы мониторинга сильных сейсмических событий не произошло. В то же время можно показать пример реакции уровня подпочвенного радона на небольшое сейсмическое событие с  $M = 3.3$ , произошедшее непосредственно на ЦСР 23 июля 2019 г. (рис. 6).

Из рис. 6 следует, что в пункте Южно-Сахалинск уровень радона практически не

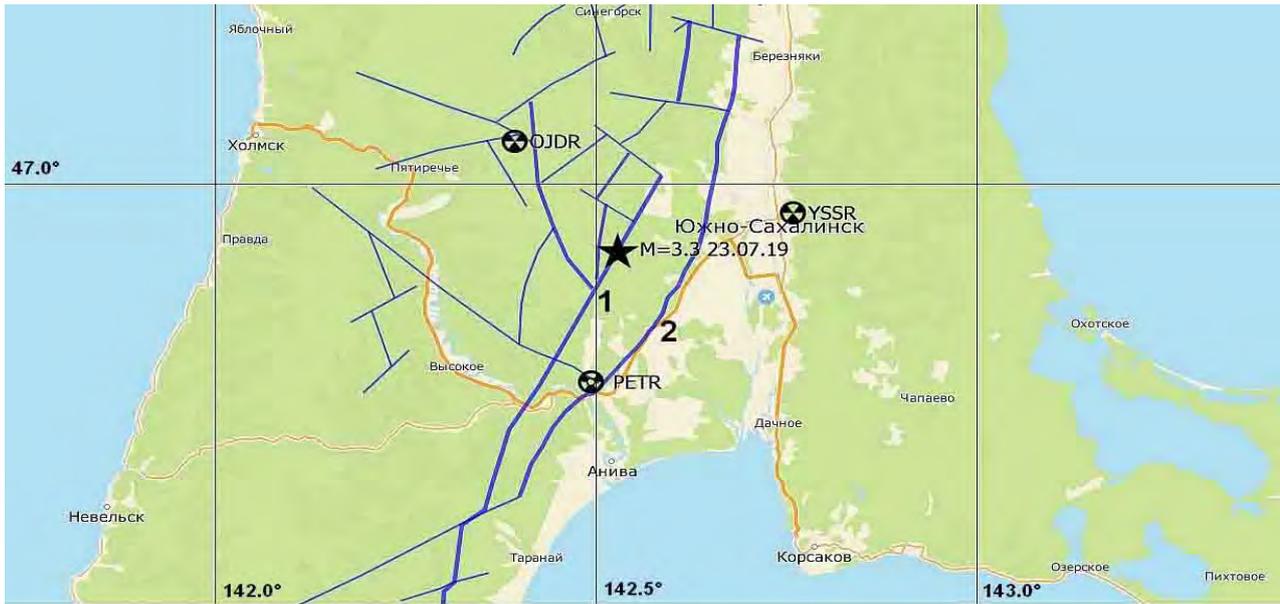
изменился, основная реакция на сейсмическое событие 23.07.2019 г. с  $M = 3.3$  отмечена в пунктах Ожидаево и Петропавловское. При этом уровень подпочвенного радона понизился 25.07.2019 г. в пункте Петропавловское, а в Ожидаево, наоборот, увеличился с 27.07.2019 г. Данный результат вполне соответствует локальной геодинамической обстановке, которая отражается в смене зон сжатия и растяжения в этом районе ЦСР [Polets, 2019]. Отсутствие реакции на данное событие пункта в Южно-Сахалинске также объяснимо с позиций структурной геологии: Южно-Сахалинск находится восточней разломной зоны (рис. 1), в данном районе, по видимому, активность существенно не изменила уровень подпочвенного радона.

На рис. 7 показаны волновые формы и спектрограммы данного сейсмического

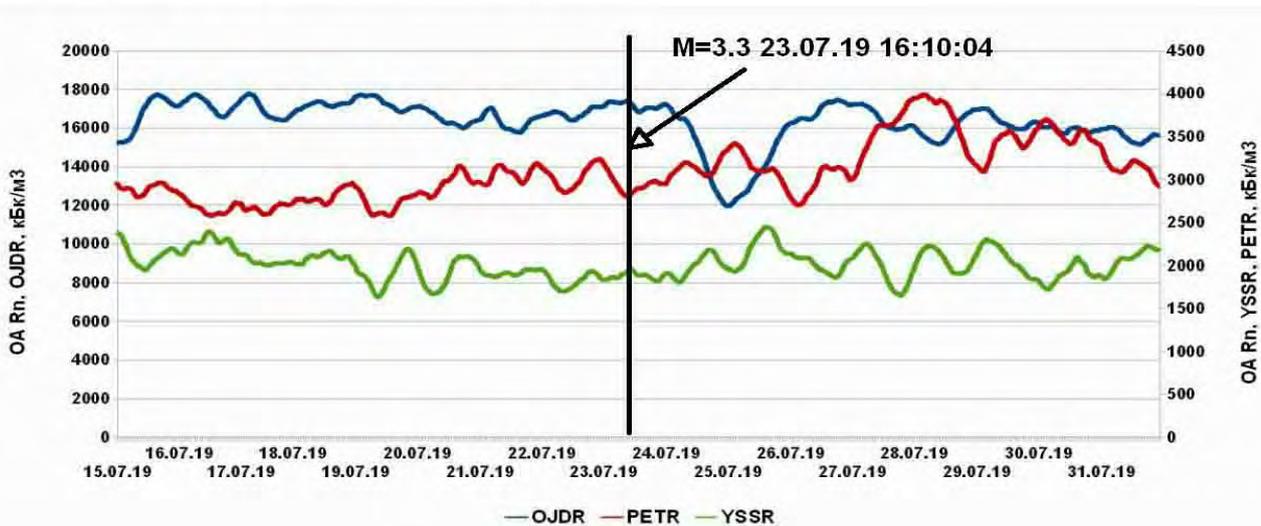
события, полученные с помощью молекулярно-электронного сейсмоприемника СМЕ-6111 и прототипа молекулярно-электронного гидрофона.

Сейсмическое событие уверенно регистрируется как сейсмоприемником СМЕ-6111, так и гидрофоном. При этом нужно отметить, что в данном случае прототипом молекулярно-электронного гидрофона не было обнаружено каких-либо низкочастотных сигналов, предшествующих основному

событию, подобных описанным в работах [Borisov et al., 2012; Борисов, Борисов, 2017]. Это отражено в спектрограмме на рис. 7. Основной спектр сейсмического сигнала гидрофона находится в диапазоне 10–40 Гц, сейсмоприемника – 5–30 Гц. В настоящее время специалистами МФТИ с учетом опыта эксплуатации первого прибора сконструирован новый прототип гидрофона, с улучшенными частотными характеристиками, который предстоит испытать в ближайшее время.

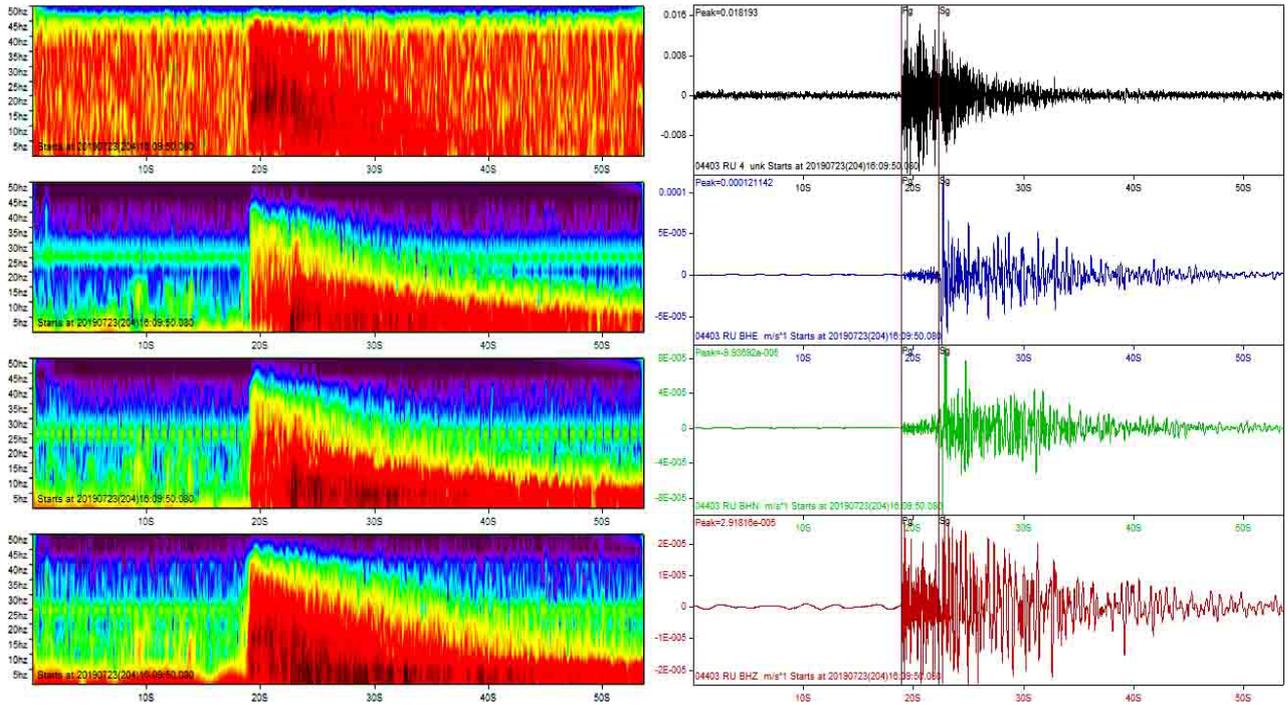


Пункты мониторинга подпочвенного радона



**Рис. 6.** Реакция уровня подпочвенного радона на землетрясение с  $M = 3.3$ , произошедшее 23.07.2019. Верхняя часть – обзорная карта. Разломы: 1 – Центрально-Сахалинский, 2 – Априловский. Нижняя – вариация уровня подпочвенного радона в пунктах Южно-Сахалинск (YSSR), Ожидаево (OJDR), Петропавловское (PETR).

**Fig. 6.** The subsurface radon level change for the earthquake with  $M = 3.3$  occurred on 23.07.2019. The top part is an overview map. 1 – Central Sakhalin Fault, 2 – Aprelovskiy fault. The lower part is the variation of the level of subsurface radon in the stations Yuzhno-Sakhalinsk (USSR), Ozhidaevo (OJDR), Petropavlovsk (PETR).



**Рис. 7.** Волновые формы (справа) и спектрограммы (слева) сейсмического события с  $M = 3.3$ , произошедшего 23 июля 2019 г., полученные с помощью молекулярно-электронного сейсмоприемника CME-6111 (цветные волновые формы) и прототипа молекулярно-электронного гидрофона (черная волновая форма).

**Fig. 7.** Wave forms (right) and spectrograms (left) of the seismic event with  $M = 3.3$  that occurred on July 23, 2019, obtained from the molecular-electronic seismometer CME-6111 (color wave forms) and the prototype of the molecular-electronic hydrophone (black wave form).

### Выводы

За относительно небольшой промежуток времени (полтора года) развернута система комплексных геофизических наблюдений в южной части Центрально-Сахалинского разлома. В настоящее время в выбранном сегменте разлома проводятся непрерывные круглогодичные геофизические исследования, включающие регистрацию сейсмических волн широкополосной и короткопериодными сейсмостанциями и гидрофоном, а также регистрацию уровня концентрации подпочвенного радона. Подобные комплексные геофизические наблюдения являются для Сахалина в определенной степени новыми. В ближайшее время планируется дооснащение пунктов наблюдений, в частности оборудованием для геоэлектрических исследований в пункте с. Петропавловское и гидрофоном с улучшенным частотным диапазоном.

За время работы оборудования получена интересная информация, характеризующая «жизнь» разлома, его геодинамическую ак-

тивность. Так, выделено несколько аномалий вариаций уровня подпочвенного радона до и после сейсмических событий в наблюдаемом регионе.

Показана необходимость сейсмологических наблюдений за разработкой Анивских газовых месторождений, находящихся в зоне регистрации развернутого оборудования. Поскольку на результаты геофизических наблюдений существенное влияние оказывают такие факторы, как сезонность, вариации метеорологических параметров и др., необходим именно непрерывный мониторинг. В процессе работы апробируется инновационное оборудование, основанное на молекулярно-электронной технологии, как серийное, так и прототипы. Оборудование зарекомендовало себя как перспективное, надежное и удобное в использовании. Совместный анализ сейсмологических, сейсмоакустических и других геофизических данных может быть использован для уточнения среднесрочного прогноза землетрясений на о. Сахалин.

## Благодарности

Авторы благодарны студенту Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета Дмитрию Алексеевичу Ващенко за помощь в обработке первичных сейсмологических данных.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (проект № 18-07-00966А, «Исследование триггерных деформационных эффектов по данным о сейсмичности Сахалина с применением сейсмических датчиков нового типа»).

## Список литературы

1. Авдюхина С.Ю., Агафонов В.М., Егоров Е.В. и др. Устройство и принцип действия молекулярно-электронного гидрофона // *Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: Труды XIV Всерос. конф. Санкт-Петербург, 23–25 мая 2018 г.* СПб., 2018. С. 621–624.

2. Агафонов В.М., Егоров И.В., Шабалина А.С. Принципы работы и технические характеристики малогабаритного молекулярно-электронного сейсмодатчика с отрицательной обратной связью // *Сейсмические приборы*. 2013. Т. 49, № 1. С. 5–18. [Agafonov V.M., Egorov I.V., Shabalina A.S. Operating principles and technical characteristics of portable molecular-electronic seismic sensor with negative feedback. *Seismic Instruments*, 2014, 50(1): 1-8. <https://doi.org/10.3103/s0747923914010022>]

3. Алиев А.А. Грязевой вулканизм Южно-Каспийского нефтегазоносного бассейна // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2006. № 3. С. 35–51.

4. Борисов А.С., Борисов С.А. Оценка параметров гидроакустических сигналов высокочастотной геоакустической эмиссии в районе Центрально-Сахалинского разлома = Borisov A.S., Borisov S.A. Estimation of parameters of hydroacoustic signals of high frequency geoacoustic emission within Central Sakhalin Fault area // *Геосистемы переходных зон*. 2017. № 3. С. 64–70. [doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.3.064-070](https://doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.3.064-070)

5. Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У., Сергеев К.Ф., Стрельцов М.И., Кожурин А.И., Бесстрашнов В.М., Стром А.Л., Сузуки Я., Цуцуми Х., Ватанабе М., Уеки Т., Шимамото Т., Окумура К., Гото Х., Кария Я. Активные разломы северо-восточного Сахалина // *Геотектоника*. 2002. № 3. С. 66–86.

6. Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. *Неотектоника и активные разломы Сахалина*. М.: Наука, 2007. 187 с.

7. Дроздин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // *Сейсмические приборы*. 2010. Т. 46, № 3. С. 22–34. [Droznin D.V., Droznina S.Y. Interactive DIMAS program for processing seismic signals. *Seismic Instruments*, 2011, 47(3): 215-224. <https://doi.org/10.3103/s0747923911030054>]

8. Ершов В.В. Флюидодинамические процессы в зоне Центрально-Сахалинского разлома (по резуль-

татам наблюдений на Южно-Сахалинском грязевом вулкане) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2012. Т. 3, № 4. С. 345–360. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-0078>

9. Закупин А.С., Богинская Н.В. Современная сейсмичность в районе Центрально-Сахалинского разлома (юг о. Сахалин): ложная тревога или отодвинутый прогноз? = Zakupin A.S., Boginskaya N.V. Modern seismicity in the area of the Central Sakhalin fault (south of Sakhalin Island): false alarm or postponed prediction? // *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 1. С. 27–34. [doi:10.30730/2541-8912.2019.3.1.027-034](https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.027-034)

10. Злобин Т.К., Бобков А.О. *Современная сейсмичность и разломная тектоника юга Сахалина*. Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2003. 124 с.

11. Каменев П.А., Заболотин А.Е., Дегтярев В.А., Жердева О.А. Разработка геомеханической модели активного разлома южного Сахалина = Kamenev P.A., Zabolotin A.E., Degtyarev V.A., Zherdeva O.A. Geomechanical model of South Sakhalin active fault // *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 3. С. 287–295. [doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.287-295](https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.287-295)

12. Козлова И.А., Юрков А.К. Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях // *Уральский геофизический вестник*. 2005. № 7. С. 31–34.

13. Костылев Д.В., Богомоллов Л.М., Каменев П.А., Закупин А.С., Богинская Н.В. Комплексный сейсмический мониторинг в районе Анивского газового месторождения // *Нефтегазовый комплекс: проблемы и решения: материалы Первой национальной науч.-практ. конф.* Южно-Сахалинск: СахГУ, 2018. С. 11–12.

14. Кучай В.К. Современная орогенная структура южной части о. Сахалин // *Тихоокеанская геология*. 1987. № 1. С. 50–57.

15. Макаров Е.О., Фирстов П.П., Костылев Д.В. и др. Первые результаты мониторинга подпочвенного радона сетью пунктов, работающей в тестовом режиме, на юге острова Сахалин // *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*. 2018. № 5 (25). С. 99–114. [doi: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-99-114](https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-99-114)

16. Мельников О.А. Дислокации и сейсмичность южной части зоны Тымь-Поронайского взбросо-надвига // *Тектоника, геодинамика, магматизм, металлогения и сейсмичность Тихоокеанского сегмента Земли*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2002. С. 50–87.

17. Мишаткин В.Н., Захарченко Н.З., Чебров В.Н. Технические средства сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами // *Сейсмические приборы*. 2011. Т. 47, № 1. С. 26–51. [Mishatkin V.N., Zakharchenko N.Z., Chebrov V.N. Hardware for the seismic subsystem of the tsunami warning service. *Seismic Instruments*, 48(1): 16-33. <https://doi.org/10.3103/s0747923912010100>]

18. Никитенко О.А., Ершов В.В., Перстнева Ю.А., Бондаренко Д.Д., Балогланов Э.Э., Аббасов О.Р. Вещественный состав продуктов деятельности грязевых вулканов Сахалина и Азербайджана: сравнительный анализ = Nikitenko O.A., Ershov V.V., Perstneva Ju.A.,

- Bondarenko D.D., Baloglanov E.E., Abbasov O.R. Substance composition produced by mud volcanoes of Sakhalin Island and Azerbaijan: the first comparison // *Геосистемы переходных зон*. 2018. Т. 2, № 4. С. 346–358. doi:10.30730/2541-8912.2018.2.4.346-358
19. Прытков А.С., Василенко Н.Ф. Деформации земной поверхности острова Сахалин по данным GPS-наблюдений // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9, № 2. С. 503–514. doi:10.5800/GT-2018-9-2-0358
20. Рождественский В.С., Сапрыгин С.М. Активные разломы и сейсмичность на Южном Сахалине // *Тихоокеанская геология*. 1999. № 6. С. 59–70.
21. Рудаков В. П. *Эманиационный мониторинг геосред и процессов*. М.: Научный мир, 2009. 175 с.
22. Сапрыгин С.М. *Тектоника плит и сейсмичность в Дальневосточном регионе*. Южно-Сахалинск: Сахалин. кн. изд-во, 2005. 83 с.
23. Тютрин И.И., Дуничев В.М. *Тектоника и нефтегазоносность северо-западной части Тихоокеанского пояса*. М.: Недра, 1985. 174 с.
24. Тютрин И.И., Дуничев В.М., Таболяков А.Я. Основные геологические результаты поисков нефти и газа на Южном Сахалине // *Советская геология*. 1981. № 3. С. 37–41.
25. Уткин В.И., Юрков А.К. Радон как индикатор геодинамических процессов // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51, № 2. С. 277–286.
26. Borisov A.S., Borisov S.A., Levin B.W., Sasorova E.V. Hydroacoustic observations of weak earthquakes in shallow waters of the Southern Kuril Islands // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2012. Vol. 3(2). P. 103–113. doi:10.5800/GT-2012-3-2-0065.
27. Chaudhuri H., Ghose D., Bhandari R.K., Sen P., Sinha B. A geochemical approach to earthquake reconnaissance at the Baratang mud volcano, Andaman and Nicobar Islands // *J. of Asian Earth Sciences*. 2012. Vol. 46. P. 52–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.10.007>.
28. Kostylev D.V., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 324, 012009. doi:10.1088/1755-1315/324/1/012009
29. Levin B.W., Sasorova E.V., Zakupin A.S., Kameney P.A. Local occurrence of the relationship between variations in the Earth's rotation rate and the dynamics of seismicity: Case study of Sakhalin // *Doklady Earth Science*. 2018. Vol. 483, N 2. P. 1575–1578. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18120188>
30. Makarov E., Firstov P., Kostylev D. et al. Test mode of operation network of monitoring subsoil radon in the south of Sakhalin // *E3S Web Conf. (IX Intern. Conf. "Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors")*. 2018. Vol. 62, 03007. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186203007>
31. Peterson J. Observations and modeling of seismic background noise. *U.S. Geol. Survey Open-File Report*. 1993. N 93-322. 94 p. <https://doi.org/10.3133/ofr93322>
32. Polets A.Yu. The stress state of the Sakhalin Island and adjacent territories // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 324, 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012010>
33. Shakirov R., Obzhairov A., Suess E., Salyuk A., Biebow N. Mud volcanoes and gas vents in the Okhotsk Sea area // *GeoMarine Letters*. 2004. Vol. 24(3). P. 140–149. <http://dx.doi.org/10.1007/s003670040177y>
34. Yang T.F., Fu C.C., Walia V. et al. Seismogeochemical variations in SW Taiwan: multiparameter automatic gas monitoring results // *Pure and Applied Geophysics*. 2006. Vol. 163(4). P. 693–709. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0040-3>

Об авторах

КАМЕНЕВ Павел Александрович (ORCID 0000-0002-9934-5855), кандидат технических наук, старший научный сотрудник ЦКП, БОГИНСКАЯ Наталья Владимировна (ORCID 0000-0002-3126-5138), научный сотрудник лаборатории сейсмологии, ЗАКУПИН Александр Сергеевич (ORCID 0000-0003-0593-6417), кандидат физико-математических наук, заместитель директора, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмологии – Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск; КОСТЫЛЕВ Дмитрий Викторович (ORCID 0000-0002-8150-9575), начальник отдела сейсмических стационаров, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», аспирант, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.

## Особенности использования данных о палеоцунами для оценок цунамиопасности

© 2019 В.М. Кайстренко

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

*E-mail: vict-k@mail.ru*

**Реферат.** Статья посвящена развитию методов оценки повторяемости цунами с использованием данных о палеоцунами. Новым ключевым моментом является построение модели для количественного учета сохранности отложений палеоцунами. Для цельности изложения в статью включен краткий обзор результатов исследований изменчивости и сохранности отложений цунами. Модель протестирована на материалах о палеоцунами на побережье в районе Халактырки (поселка в составе г. Петропавловск-Камчатский), полученных ранее, для четырех временных интервалов, задаваемых четко прослеживаемыми в разрезах отложениями маркирующих пеплов извержений вулканов Ксудач в 1907 г., Авачинский в 1855 и в 1779 гг., Опала в 606 г. Приведены максимально правдоподобные оценки количества цунамигенных горизонтов для указанных временных интервалов. Проанализированы ограничения построенной модели, связанные с заложенными в нее условиями.

**Ключевые слова:** цунами, заплеск, палеоцунами, отложения цунами, повторяемость, цунамиопасность, вероятностная модель, статистика.

*Для цитирования:* Кайстренко В.М. Особенности использования данных о палеоцунами для оценок цунамиопасности. *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 4. С. 403–416.  
<https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.403-416>

## Peculiarity of using the paleotsunami data for the tsunami hazard estimation

*Victor M. Kaistrenko*

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

*E-mail: vict-k@mail.ru*

**Abstract.** The work is focused on the developing of the methods of the tsunami recurrence evaluation using paleotsunami data. The new key moment is the model for the quantitative evaluation of the preservation potential of the paleotsunami deposits. The short topical review on the preservation / changeability of the paleotsunami deposits is included. Paleotsunami data found earlier on the Khalaktyrka coast near Petropavlovsk-Kamchatskiy have been used for testing of the developed model. All the data have been divided and considered separately according to the time intervals between marker explosions of volcanoes Ksudach (1907), Avachinskiy (1855 and 1779) and Opala (606). The maximal confident estimates of the tsunami deposit numbers have been received as well as their probability of preservation. Some restrictions related to the model conditions have been analyzed.

**Keywords:** tsunami, run-up height, paleotsunami, tsunami deposits, recurrence, tsunami hazard, probabilistic model, statistics.

*For citation:* Kaistrenko V.M. Peculiarity of using the paleotsunami data for the tsunami hazard estimation. *Geosystems of Transition Zones*, 2019, vol. 3, no. 4, pp. 403–416. (In Russian)  
<https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.403-416>

### Геологические следы цунами на побережьях

Цунами – грозное природное явление, характерное для дальневосточного побережья России [Левин, Носов, 2005]. Редкость разрушительных цунами – благо для людей, проживающих на этих берегах, для ученых имеет и оборотную сторону – нехватку натурных данных о физике цунами, частоте и особенностях их проявлений на разных типах побережий. Недостаточность данных в каталогах исторических цунами, доступных в сети интернет [HTDB/WLD: Historical Tsunami Database...; NGDC: Tsunami Data...], не позволяет количественно оценить цунамиопасность для ряда побережий с приемлемой точностью. Требуемая для оценки повторяемости продолжительность времени регистрации сильных и катастрофических цунами, представляющих реальную опасность, – несколько столетий. К сожалению, такая длительность наблюдений, зафиксированная в исторических хрониках, имеется лишь для нескольких пунктов на тихоокеанском побережье Японии и Южной Америки.

Исследования, начатые независимо в разных странах, показали, что сильные цунами оставляют геологические следы на атакованных ими побережьях [Marinatos, 1939; Каплин, Ионин, 1961; Kastens, Cita, 1981; Moore and Moore, 1984, 1986; Bourgeois et al., 1988; Dawson et al., 1988; Бобыкина, 1990; Paskoff, 1991; Atwater, Moore, 1992].

Однако «прорыв» в этой области исследований произошел после пионерских работ К. Миноура [Minoura, Nakaya, 1991; Minoura, Nakata, 1994]. Было обнаружено, что сильное цунами 1983 г. в Японском море перенесло пляжный песок далеко вглубь берега, включая прибрежные озера. Исследование осадочных колоннок выявило, наряду с отложениями 1983 г., следы от прежних цунами, и, что важно – все эти песчаные прослои, как новые от цунами 1983 г., так и выделенные в осадочных колонках, оказались идентичными по составу и структуре, и, значит, это следы однотипных явлений.

Стало ясно, что все сильные цунами являются геологическим фактором в динамике прибрежной зоны. Цунами оставляют следы на побережьях в виде отложений (аккумуляция материала), но временами стирают такие следы вместе с частями берега (эрозия), сильно изменяя сам вид побережья. Так, одним из следствий Симуширского цунами 15 ноября 2006 г. на центральных Курильских островах явилась масштабная эрозия некоторых участков побережья о. Матуа [MacInnes et al., 2009a]. Перспектива получить необходимую информацию с помощью изучения следов доисторических событий заставила изучать палеоцунами, постепенно развивая технологию таких работ, которая включает методику поиска отложений, их идентификацию, временную привязку, а также методы их статистического анализа.

Следует отметить, что в значительной мере именно с исследованиями палеоцунами связана надежда получения количественных оценок повторяемости цунами, их опасности и риска с приемлемой точностью, что необходимо для планирования развития побережий и градостроительства в прибрежной зоне [Kaistrenko et al., 2003; Кайстренко и др., 2014; Свод правил... , 2017].

Постоянно расширяющийся фронт исследований следов палеоцунами в мире подчеркивает актуальность и перспективность таких исследований (рис. 1). К примеру, за 11 месяцев 2019 г. было опубликовано 169 работ по этой теме.

В России наиболее подробно исследованы палеоцунами на побережье Камчатки, Южных Курильских островов и Приморья,

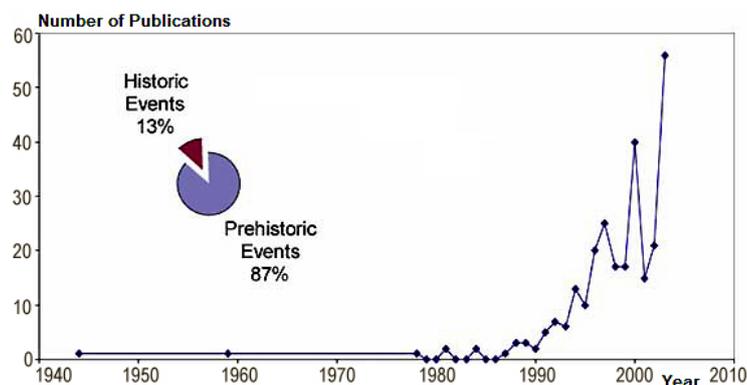


Рис. 1. Рост количества публикаций по теме отложений цунами до 2006 г. [Keating, 2006].

в меньшем масштабе – на Сахалине, Северных и центральных Курильских островах [Пинегина, Разжигаева, 2013; Bourgeois et al., 2006; Pinagina et al., 2003; Булгаков и др., 1995; Разжигаева и др., 2008, 2012; Ганзей и др., 2015].

Постоянно растущий объем данных о палеоцунами – очень перспективный материал и в то же время достаточно проблемный при непосредственном использовании для оценок цунамиопасности и риска, в частности из-за частичного «стирания» следов цунами.

Целью данной работы является разработка количественного метода получения оценок опасности, в первую очередь повторяемости цунами, с использованием данных о палеоцунами с учетом вероятности их сохранности.

### Отложения современных цунами, их формирование и сохранность

При интерпретации данных по отложениям палеоцунами большое значение имеют результаты изучения особенностей осадконакопления, связанных с современными крупными цунами. Анализ отложений современных событий – Япономорских цунами 1983 и 1993 гг. на побережье Приморья, Шикотанского цунами 1994 г. (острова Шикотан, Юрий, Кунашир), Индонезийского 2004 г. (острова Симелу, Суматра), Симуширского 2006 г. (острова Симушир, Матуа, Расшуа, Рыпонкича) и Тохоку цунами 2011 г. (о. Шикотан) позволили выявить ряд закономерностей их формирования и сохранности, что необходимо для получения корректных оценок повторяемости цунами [Иванов, 1997; Разжигаева и др., 2007; MacInnes et al., 2009 a, b; Razjigaeva et al., 2014; Ганзей и др., 2015, 2017].

Даже на небольшой территории одно и то же цунами приводит к накоплению осадков разного состава. Зона осадконакопления, как правило, не достигает линии максимальной заплеска (рис. 2).

Рис. 2 показывает, что цунами откладывает наибольшее количество материала в «средней трети» зоны

затопления: вблизи берега материал слабо осаждается из высокоскоростного потока, а в зоне максимального заплеска материала в потоке уже почти не остается.

Отложения цунами на крутых склонах со временем обычно смываются атмосферными осадками, но в условиях прибрежных торфяников, где уклоны очень малы, отложенный цунами пляжный материал, в основном песок, с годами закрепляется растительным покровом и может затем сохраняться столетиями и тысячелетиями. Очевидно, до закрепления отложений цунами новым растительным покровом они подвержены существенному воздействию ветра и размыву атмосферными осадками и тальными водами. Кроме того, отложения цунами деформируются прорастающими снизу растениями и корнями нового растительного покрова, а также обитающими в этой среде насекомыми (биотурбация). Одна из актуальных задач при изучении отложений цунами – изучение изменчивости и сохранности (preservation potential) отложений цунами в масштабе геологического времени. И хотя эта проблема была обозначена довольно давно [Einsele et al., 1996; Иванов, 1997], она до сих пор остается актуальной.

При обследовании проявлений Япономорских цунами 1983, 1993 гг. на побережье Приморья в первые месяцы после событий анализ особенностей осадконакопления не проводился. Позже осадки этих цунами были найдены на побережье бухт, где величина заплеска волн, как правило, превышала 3 м. Выяснилось, что наилучшая сохранность осадков наблюдается в бухтах, приуроченных к низкопорядковым водотокам [Ганзей и др., 2017].



Рис. 2. Схематическое положение зон эрозии и аккумуляции материала в зоне воздействия прямого потока цунами по [Jaffe, Gelfenbaum, 2007].

Сохранность осадков Шикотанского цунами 1994 г. в нескольких бухтах тихоокеанского побережья о. Шикотан была обследована через год после события – большей частью они залегали песчаными пятнами или узкими полосами в небольших перегибах рельефа [Иванов, 1997]. Обследование, проведенное десятилетием позже [Разжигаева и др., 2007], показало, что осадки цунами 1994 г. сохранились в разрезах береговой зоны островов. Наиболее благоприятные условия для осаждения и захоронения осадков цунами создавались в локальных понижениях рельефа нижней части заболоченных долин за древними штормовыми валами на разном удалении от уреза моря (от 130 до 470 м).

Проявление катастрофического Тохоку цунами 2011 г. на побережье Южных Курильских островов, вследствие удаленности от очага, было умеренным. Тем не менее сравнительное исследование отложений этого цунами, проведенное в 2011 и 2012 гг., показало [Razjigaeva et al., 2013, 2014], что осадки цунами, отложенные поверх торфа, оставались влажными и активно зарастали травяным покровом. Перемещения осадков вследствие ветрового переноса обнаружено не было. Годовая изменчивость гранулометрического состава оказалась незначительной.

Интересные и значимые количественные результаты по теме сохранности отложений цунами изложены в работах [Szczucin'ski, 2012; Spiske et al., 2013], там же приведены ссылки на ряд других работ.

Исследования 5-летних изменений, произошедших в отложениях катастрофического цунами 2004 г. толщиной от нескольких миллиметров до более чем полуметра и документированных через 1, 2, 3 и 4 года вдоль 13 профилей на побережье Таиланда [Szczucin'ski, 2012], позволили сделать ряд важных заключений о динамике отложений цунами в условиях тропического климата с обильными сезонными ливнями.

Прежде всего, за время наблюдений существенно уменьшился пространственный размер зоны с распознаваемыми отложениями. На участках с толщиной отложений менее 1–2 см уже через год отложения не распознавались.

Среди ряда факторов, влияющих на сохранность/изменчивость отложений, важнейшим оказалась их исходная толщина. Тонкие слои песков и илов, отложенные цунами в местах с высотами волны менее 3 м (примерно 20 % мест), большей частью не сохранились, и вероятность сохранности прослоев толщиной менее 10 см оказалась достаточно мала. И наоборот, отложения толщиной более 10 см сохранились хорошо. В них даже сохранялась внутренняя структура, кроме самых верхних слоев, смытых, видимо, ливневыми потоками [Szczucin'ski, 2012].

В ряде профилей изначально типичный сдвиг гранулометрических распределений в сторону тонких фракций по мере удаления от берега сменился увеличением доли грубого материала с ростом расстояния от берега [Szczucin'ski, 2012].

Обследования илесто-песчано-обломочных отложений трех цунами на побережье Перу: Чимботе 1996 г., Каманья 2001 и Писко-Паракас 2007 г., проведенные в первый месяц после каждого события и повторенные в 2007 и 2008 гг., продемонстрировали заметную динамику отложений в сухом климате этого региона [Spiske et al., 2013]. Важнейшими факторами, определяющими изменчивость отложений цунами, оказались тип отложения, гранулометрический состав, биотурбация, ветер и антропогенное воздействие. В целом сохранность отложений из грубого материала оказалась заметно выше по сравнению с отложениями тонкого материала, которые из-за ветрового переноса начали эродировать сразу же после их образования. Однако в условиях сухого климата высохшие илестые прослойки твердели и сохранялись хорошо. Отмечено, что верхние слои отложений, подверженные поверхностным процессам, эродировали первыми [Spiske et al., 2013]. Финальный вывод, сделанный в цитируемой работе: материал, отложенный цунами в разрезах современных побережий, не является вполне представительным для непосредственной оценки уязвимости побережья к цунами и требует коррекции на изменчивость и сохранность. К похожему выводу пришли и авторы работы [Keating et al., 2011].

Схематическое объяснение причин изменений в отложениях цунами представлено на рис. 3.

Интересное наблюдение приведено в [Oliveira et al., 2008]: только в 25 % мест на атлантическом побережье, атакованных, согласно хроникам, катастрофическим Лиссабонским цунами в 1755 г., обнаружались отложения этого цунами. Это означает, что в остальных 75 % мест цунами либо не сформировало отложения, либо они не сохранились по причинам природного и антропогенного воздействия.

В условиях побережий Дальнего Востока России с умеренным климатом закрепление отложений цунами новым растительным покровом происходит медленнее, чем в зонах

с тропическим климатом, отложения также подвержены существенному воздействию ветра и размыву атмосферными осадками и талыми водами. Очевидно, что развитие методов и моделей, позволяющих количественно оценивать изменчивость/сохранность отложений цунами, актуально и в чисто научном и прикладном смысле для использования данных о палеоцунами для оценок цунамиопасности.

### Особенности статистического учета данных о палеоцунами на примере района Халактырка, Камчатка

В течение длительного времени основным видом натуральных материалов, с которыми работали специалисты по проблеме цунами, были данные о максимальных заплесках

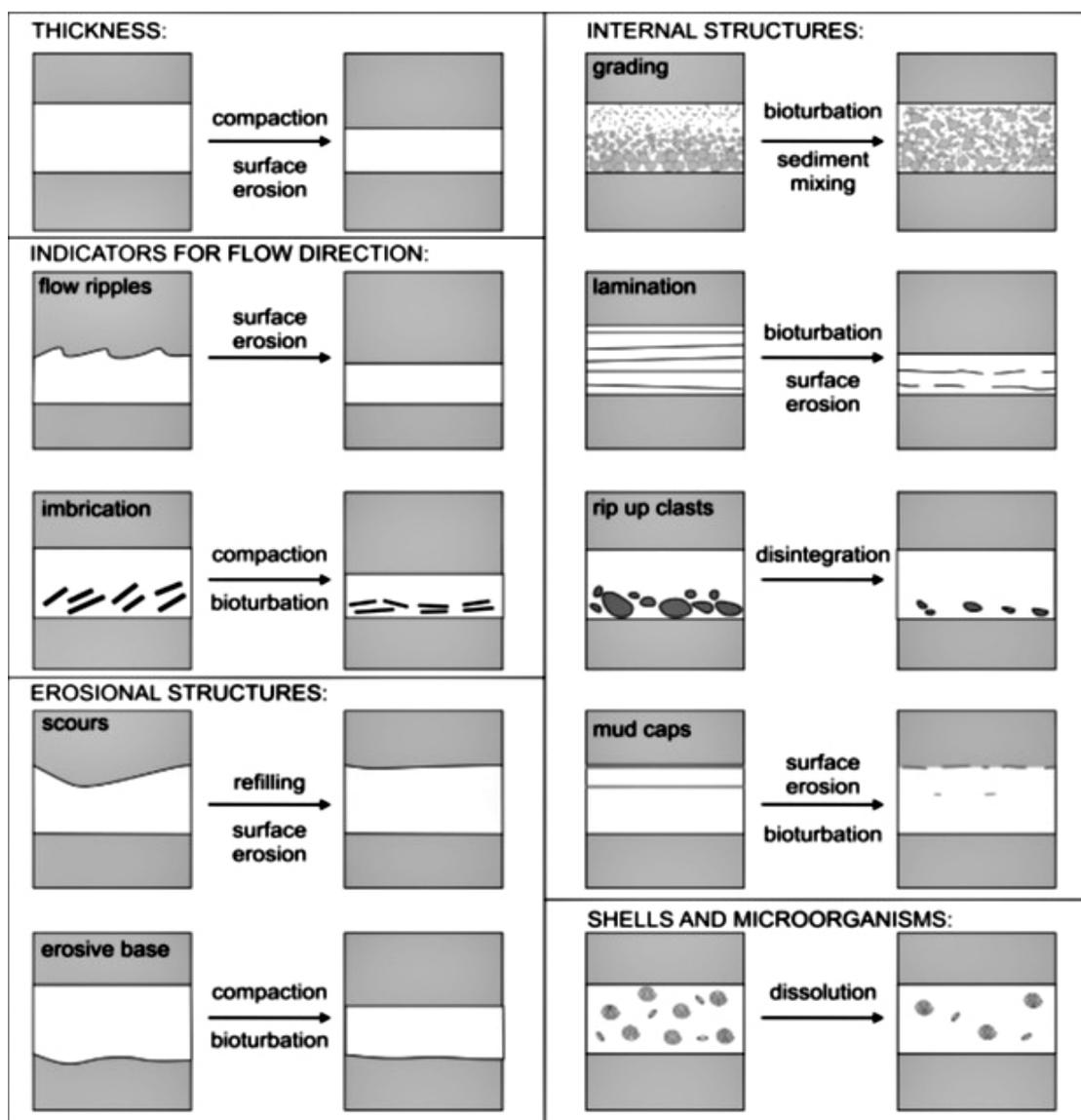


Рис. 3. Схематическое объяснение причин изменений в отложениях цунами [Spiske et al., 2013].

цунами, собранные в каталогах. Главная особенность такого материала – это данные о высотах, которые были *достигнуты* волнами цунами. Наличие же отложений палеоцунами, обнаруженных на некотором уровне над океаном, свидетельствует о том, что данный уровень цунами *превысило*. Каков же при этом был максимальный заплеск – неизвестно. Несомненно, что очень перспективные, хотя и достаточно проблемные, новые данные о палеоцунами и традиционные данные о заплесках цунами – это два разных типа данных, которые надо научиться использовать совместно.

Один из путей решения этой проблемы – разработка методик получения оценок заплесков на основе совокупности параметров отложений цунами. Три последних катастрофических цунами – Индонезийское 2004 г., Симуширское 2006 и Тохоку 2011 г. – предоставили полигоны для выявления закономерностей в динамике «свежих» отложений цунами, а также вызвали появление ряда работ, посвященных поиску зависимостей между характеристиками исходной волны цунами, такими как глубина и скорость потока, максимальная протяженность зоны затопления, величина вертикального заплеска, и параметрами отложений цунами, такими как протя-

женность песчаного покрова, появившегося в результате цунами, его гранулометрические, геохимические и диатомовые характеристики [Jaffe, Gelfenbaum, 2007; Abe et al., 2012; Cheng, Weiss, 2013; Chagué-Goff et al., 2015; Soulsby et al., 2007; Srisutam, Wagner, 2010; Witter et al., 2012]. Перенос закономерностей, найденных в этих работах для отложений современных цунами, на отложения палеоцунами с учетом изменчивости отложений до их фиксации, позволяет получать только достаточно грубые оценки вертикальных заплесков для палеоцунами.

На самом деле данные и о заплесках цунами, и о палеоцунами, собранные в каком-либо месте побережья, могут совместно и вполне корректно использоваться для построения функции повторяемости высот цунами для конкретного места. Суть такого прямого метода рассмотрена ниже на примере побережья в районе Халактырки, поселка в составе г. Петропавловск-Камчатский, открытого Тихому океану и, соответственно, подверженного воздействию цунами. Наличие свидетельств о проявлениях исторических цунами побудило провести поиск следов палеоцунами в этом районе (рис. 4 и 5) [Пинегина и др., 2002].

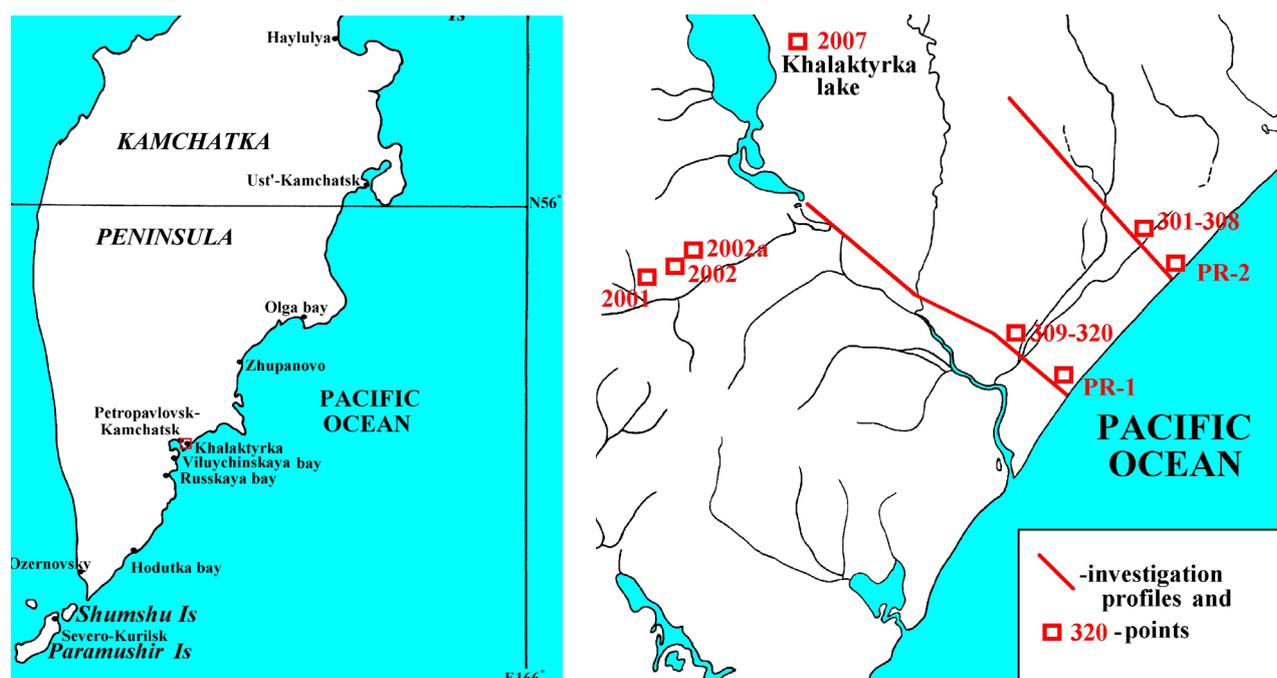


Рис. 4. Район исследований на тихоокеанском побережье Камчатки и местоположение профилей и разрезов [Пинегина и др., 2002].

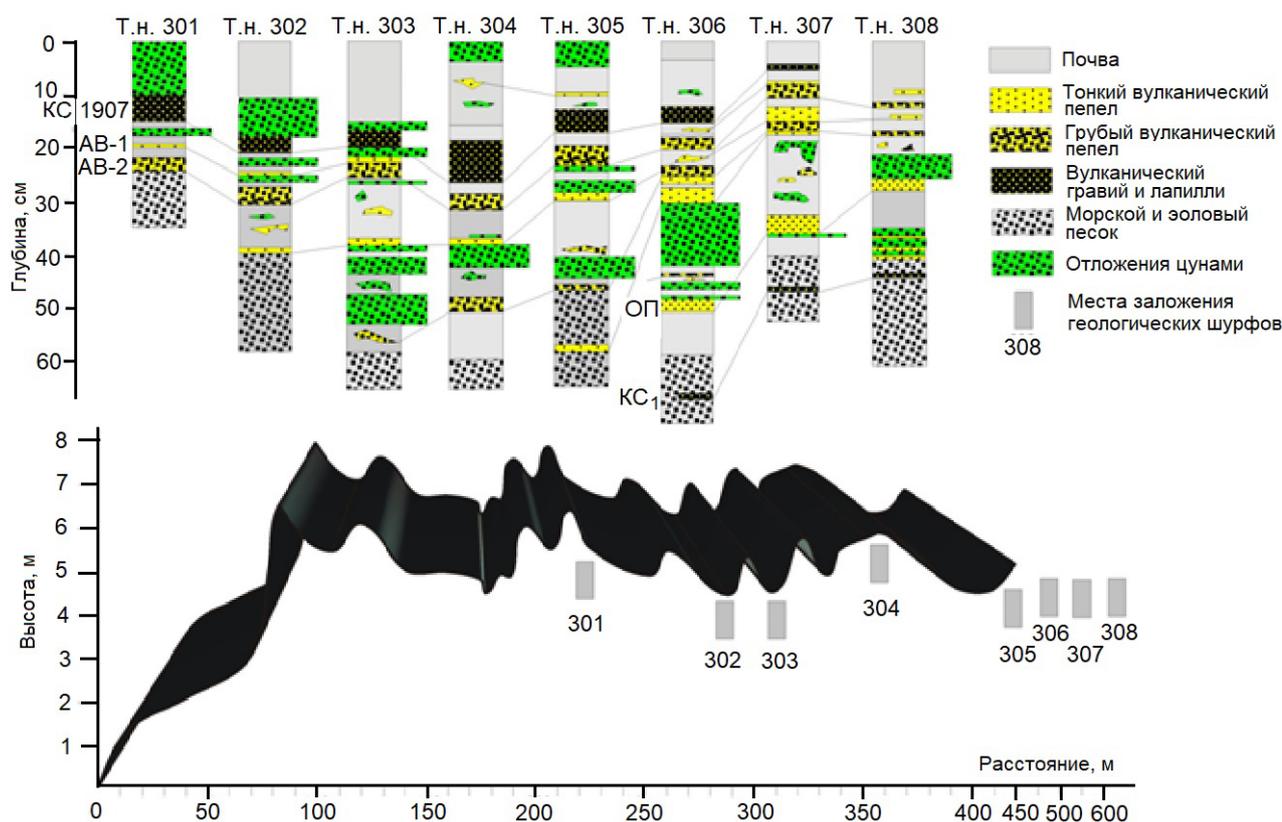


Рис. 5. Геоморфологический профиль 2 и схемы разрезов [Пинегина и др., 2002].

Рис. 5 демонстрирует типичные черты прослоев цунами. Как правило, отложения цунами образуют сплошные покровы лишь при высотах волны порядка 10 м и выше, чаще они располагаются пятнами. Воздействие поверхностных процессов снижает сохранность слоев и приводит к тому, что каждый разрез содержит свой набор отложений, с частичным перекрытием наборов из соседних разрезов. Отложения вулканических пеплов, как видно из рис. 5, прослеживаются вдоль профиля гораздо отчетливее и надежнее. И, соответственно, при корреляции и датировке отложений палеоцунами использовался метод тефростратиграфии и тефрохронологии, позволяющий определять стратиграфическое положение, относительный и абсолютный возраст цунамигенных горизонтов в геологических разрезах, опираясь на изученные ранее состав и возраст голоценовых маркирующих горизонтов вулканических пеплов для Камчатки [Braitseva et al., 1997].

В исследуемом районе на побережье Халактырского пляжа было выделено 13 цунамигенных горизонтов (Ц1–Ц13) [Пинегина и др., 2002]. Отложения цунами представле-

ны, как правило, тонкими (от 0.5 до 20 см) прослоями темно-серых, за счет примеси в них большого количества темноцветных минералов, морских песков, иногда с галькой (до нескольких сантиметров) и включениями древесины.

Понятно, что формирование следов различных цунами происходило в разных условиях. В то же время такую усредненную характеристику, как вероятность  $p$  сохранности отложений, следует использовать в условиях, близких к однородным. С этой целью можно разделить весь временной интервал, в котором выявлены цунамигенные горизонты, на ряд интервалов меньшей длительности, в пределах которых условия формирования отложений более однородны. Используем для этого четкие временные границы, задаваемые отложениями маркирующих пеплов извержений вулканов Ксудач в 1907 г. (КС1907), Авачинский в 1855 (АВ-1) и в 1779 гг. (АВ-2), Опала в 606 г. (ОП), Ксудач в 236 г. (КС<sub>1</sub>) (рис. 5) и Авачинский около 1500 лет до н.э. (АВ-12). С этой же целью для исследования выбраны компактные группы разрезов в «средней» части профилей 1 и 2:

302–306 (на расстоянии 270–500 м от уреза, рис. 5) и 309–313 (на расстоянии 250–440 м от уреза) [Пинегина и др., 2002].

Данные о количестве цунамигенных прослоев в каждом из исследуемых разрезов, попадающих во временной интервал между горизонтами маркирующих вулканических пеплов, сведены в таблицу.

Позиции разрезов 302–306 и 309–313 разновысотные, однако с отложениями цунами в этих разрезах ассоциируется высота берегового вала  $h$ , поскольку цунами достигло их, преодолев береговой вал высотой  $h = 8$  м (рис. 5).

Пусть в некотором пункте (территории) у побережья имели место  $N$  палеоцунами, с отложениями которых ассоциирована высота  $h$  над уровнем океана. Известно, что последовательность сильных цунами близка к пуассоновской [Geist, Parsons, 2008]. Этой ситуации отвечает вероятность превышения уровня  $h$  при  $N$  цунами за период времени  $T$ :

$$P_N = e^{-\varphi(h)} \frac{[\varphi(h) \cdot T]^N}{N!}, \quad (1)$$

где  $\varphi(h)$  – функция повторяемости высот цунами (ФПЦ), важнейшая характери-

ка цунамиактивности; знание этой функции позволяет количественно оценивать цунами-опасность. В соответствии с определением, ФПЦ – это средняя частота событий в заданном месте с высотой равной или превышающей пороговое значение  $h$ :

$$\varphi(h) = \stackrel{\text{def}}{=} \left\langle \frac{N(\text{заплеск} \geq h)}{T} \right\rangle, \quad (2)$$

где  $N$  есть число таких событий, произошедших за период времени  $T$ . Показано [Kaistrenko, 2011, 2014], что функция повторяемости высот цунами зависит от двух параметров, характеризующих цунамиактивность заданного места с координатами  $x$ : регионального параметра – асимптотической частоты сильных цунами  $f$ , и локального параметра – характеристической высоты цунами  $H^*$ :

$$\varphi(x; h) = f \cdot \Phi \left( \frac{h}{H^*(x)} \right), \quad (3)$$

где функцию  $\Phi$  комбинированного аргумента  $h / H^*(x)$  требуется определить на основе натуральных данных. Показано, что для больших высот исторических цунами и палеоцунами (цунами с малыми высотами не опасны и не оставляют следов) функцию  $\Phi$  в (3)

**Количество цунамигенных прослоев в разрезах, относящихся к заданному временному интервалу, и оценка вероятности их сохранности**

Разрез	Временной интервал, годы			
	Наст. время – 1907	1907–1855	1855–1779	1779–606
302	1	1	1	0
303	1	1	0	0
304	2	0	0	0
305	2	0	0	0
306	1	0	0	0
309	2	0	1	3
310	0	0	0	0
311	1	0	0	3
312	1	0	0	2
313	1	0	2	2
Цунамигенные прослой	Ц1–Ц2	Ц3	Ц4–Ц5	Ц6–Ц8
Наиболее вероятное количество $N$ прослоев палеоцунами	2	1	Неопределенное	Неопределенное
$p$	0.6	0.2	$\geq 2$ $\leq 0.2$	$\geq 3$ $\leq 0.33$

Примечание. Выделены наиболее правдоподобные оценки вероятности сохранности отложений.

можно аппроксимировать экспонентой [Kaistrenko, 2014]:

$$\varphi(x; h) = f \cdot e^{-\frac{h}{H^*(x)}}. \quad (4)$$

Формулу (1) невозможно использовать непосредственно, поскольку она содержит неизвестное значение  $\varphi(h)$  функции повторяемости высот цунами, отвечающее пороговой высоте  $h$  над уровнем океана. Однако известно, что вероятность  $P_N$  принимает наибольшее значение при  $\varphi(h) = N / T$ . Это максимально правдоподобное [Крамер, 1975] значение ФПЦ, соответствующее отложениям  $N$  палеоцунами, с которыми ассоциирована высота  $h$  над уровнем океана. Таким образом, на основе надежных оценок количества отложений  $N$  палеоцунами и временного периода  $T$  их образования можно получить максимально правдоподобные оценки значения функции повторяемости высот цунами  $\varphi(h)$  для ассоциированной с этими отложениями высоты  $h$  над уровнем океана. Следует отметить, что максимальное значение вероятности  $P_N$  при этом достаточно мало и зависит только от реального числа отложений цунами  $N$ . Подставляя максимально правдоподобное значение ФПЦ в формулу (1), получим

$$\max P_N = e^{-N} \frac{N^N}{N!}, \quad (5)$$

что дает  $\max P_1 = e^{-1}$  при  $N = 1$ . Используя формулу Стирлинга для факториала [Лаврентьев, Шабат, 1987], можно получить более удобную асимптотику для оценок искомого значения  $\max P_N$  при больших значениях  $N$ :

$$\max P_N \sim \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \left(1 - \frac{1}{12N} + O\left(\frac{1}{N^2}\right)\right). \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что ситуации с находками большого количества отложений цунами, относящихся к любому уровню  $h$ , весьма редки априори.

На самом деле мы не можем быть уверены, что выявленные  $n$  отложений палеоцунами – это и есть все палеоцунами  $N$  в некотором пункте (территории) у побережья, относящиеся к периоду времени  $T$  и ассоциированные с высотой  $h$  над уровнем океана, поскольку не все следы палеоцунами сохра-

няются. Вероятность  $p_n$  обнаружить в разрезе  $n$  прослоев палеоцунами, ассоциированных с некоторым уровнем  $h$ , с учетом вероятности  $p$  их сохранности можно посчитать: эта вероятность складывается из вероятности сохранения  $n$  палеоцунами из  $n$ , реально имевших место, плюс вероятности имевших место  $(n + 1)$  палеоцунами, от которых в разрезе сохранились только  $n$  прослоев, и т.д.:

$$\begin{aligned} p_n &= e^{-t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)} \left[ \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^n}{n!} C_n^n p^n + \right. \\ &+ \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^{n+1}}{(n+1)!} C_{n+1}^n p^n q + \\ &+ \left. \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^{n+2}}{(n+2)!} C_{n+2}^n p^n q^2 + \dots \right] = \\ &= e^{-t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)} \left[ \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^n}{n!} \frac{n!}{n! 1!} p^n + \right. \\ &+ \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^{n+1}}{(n+1)!} \frac{(n+1)!}{n! 1!} p^n q + \\ &+ \left. \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^{n+2}}{(n+2)!} \frac{(n+2)!}{n! 2!} C_{n+2}^n p^n q^2 + \dots \right] = \\ &= e^{-t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)} \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^n}{n!} p^n \left[ 1 + \right. \\ &+ \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^1}{1!} q + \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)\right)^2}{2!} q^2 + \dots \left. \right] = \\ &= e^{-t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)(1-q)} \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)p\right)^n}{n!} = \\ &= e^{-t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)p} \frac{\left(t\varphi\left(\frac{h}{H^*}\right)p\right)^n}{n!}, \quad (7) \end{aligned}$$

где  $q = 1 - p$  – вероятность «стирания» следов палеоцунами.

Сравнение формул (1) и (7) показывает, что частичная сохранность следов палеоцунами приводит к появлению занижающего коэффициента  $p < 1$  при  $\varphi(h)$ , что, соответственно, пропорционально уменьшает оценку величины повторяемости цунами, получаемой непосредственным подсчетом количества прослоев палеоцунами.

Покажем, что при работе с несколькими разрезами, ассоциированными с одинаковой для них высотой  $h$  над уровнем океана, можно получить оценки вероятности  $p$  сохранности

следов палеоцунами и оценку их реального количества  $N$ , которое характеризует повторяемость палеоцунами (см. формулу (3)) и может не совпадать с количеством  $n$  обнаруженных следов ( $n \leq N$ ). Пусть в  $m$  таких разрезах обнаружили  $n_1, n_2, \dots, n_m$  отложений цунами, относящихся к одному и тому же периоду времени  $T$ . Как получить реалистичную оценку количества  $N$  палеоцунами?

Прежде всего вероятность обнаружить в  $k$ -м разрезе  $n_k$  отложений из  $N$  реально имевших место палеоцунами можно оценить биномиальным распределением [Крамер, 1975]:

$$P_{(k)} = C_N^{n_k} p^{n_k} q^{N-n_k} \quad (8)$$

и построить функцию правдоподобия, равную произведению вероятностей, относящихся к каждому разрезу:

$$\begin{aligned} L &= \prod_{k=1}^m P_{(k)} = \prod_{k=1}^m \frac{N!}{n_k! \cdot (N-n_k)!} p^{n_k} q^{N-n_k} = \\ &= \prod_{k=1}^m \frac{N! \cdot q^N}{n_k! \cdot (N-n_k)!} \left(\frac{p}{q}\right)^{n_k}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для упрощения анализа обычно используется логарифмическая функция правдоподобия:

$$\begin{aligned} \ln L &= \ln \prod_{k=1}^m P_{(k)} = \\ &= \ln \prod_{k=1}^m \frac{N! \cdot q^N}{n_k! \cdot (N-n_k)!} \left(\frac{p}{q}\right)^{n_k} = m \cdot \ln N! + \\ &+ mN \cdot \ln q + \sum_{k=1}^m [n_k \cdot \ln \frac{p}{q} - \ln(n_k!) - \\ &- \ln(N-n_k)!]. \end{aligned} \quad (10)$$

Значения количества палеоцунами  $N$  и вероятности  $p$ , максимизирующие величину функции правдоподобия, следует использовать как наиболее вероятные (максимально правдоподобные). Максимизировать величину функции правдоподобия можно либо по одной из переменных (только по  $N$  или по  $p$ , если значение другой переменной не вызывает сомнения), либо совместно по  $N$  и  $p$ .

Задачу поиска максимума функции правдоподобия  $\ln L$  по двум переменным  $N$  и  $p$  можно упростить сведением к задаче поиска максимума по одной переменной, поскольку значения параметров  $N$  и  $p$ , соответствующих максимальной вероятности  $\ln L$  при фиксиро-

ванном значении  $N$ , связаны аналитической зависимостью, получаемой из условия максимума  $\ln L$  только по параметру  $p$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln L}{\partial p} &= -\frac{mN}{q} + \sum_{k=1}^m [n_k \cdot \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{q}\right)] = \\ &= -\frac{mN}{q} + \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{pq} = -\frac{mN}{q} + \\ &+ \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{pq} = \frac{1}{q} [-mN + \frac{1}{p} \sum_{k=1}^m n_k] = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

откуда получаем

$$p = \frac{\sum_{k=1}^m n_k}{mN}. \quad (12)$$

Значение для  $p$ , задаваемое формулой (12), является максимально правдоподобным при известном значении количества палеоцунами  $N$ . Если величину  $N$  требуется оценить совместно с  $p$ , нужно подставить полученное значение  $p$  в формулу (10). В результате получим зависимость  $\ln L$  только от  $N$ :

$$\begin{aligned} \ln L &= m \cdot \ln N! + mN \cdot \ln q + \ln \frac{p^{\sum_{k=1}^m n_k}}{q^{\sum_{k=1}^m n_k}} - \\ &- \sum_{k=1}^m \ln(n_k!) - \sum_{k=1}^m \ln(N-n_k)! = \\ &= mN \cdot \ln q + \ln \frac{p^{\sum_{k=1}^m n_k}}{q^{\sum_{k=1}^m n_k}} - \sum_{k=1}^m \ln(n_k!) + \\ &+ \sum_{k=1}^m (\ln N! - \ln(N-n_k)!), \end{aligned} \quad (13)$$

которая анализируется численно перебором (разумных) значений  $N$ , начиная с максимального количества прослоев цунами  $\max n_k$  в ряду величин  $n_1, n_2, \dots, n_m$ .

Значения оценок количества отложений цунами  $N$  и вероятности  $p$  их сохранности в заданных временных интервалах, полученные максимизацией функции правдоподобия, внесены в вышеприведенную таблицу.

Анализ функции правдоподобия (12) показал, что оценки количества цунамигенных горизонтов для временных интервалов настоящее время – 1907 г. и 1907–1855 гг. действительно являются максимально правдоподобными: наиболее вероятное количество палеоцунами, реально имевших место, согласующееся с их распределением в 10 разрезах, совпадает с количеством выделенных прослоев Ц1–Ц2 и Ц3 соответственно (см. таблицу).

Интересно, что оценки вероятности сохранности цунамигенных прослоев для этих

временных интервалов,  $p = 0.6$  и  $p = 0.2$ , характеризующие условия их формирования, существенно различаются.

Для двух других временных интервалов: 1855–1779 и 1779–606 гг. – количество выделенных прослоев Ц4–Ц5 и Ц6–Ц8 не согласуется с их распределением в 10 разрезах, и этим количествам не отвечает максимум функции правдоподобия. Причин, объясняющих такое расхождение, может быть несколько. Возможно, что для статистической компенсации низкой вероятности сохранения следов некоторых цунами недостаточно 10 исследуемых разрезов. Возможно также, что условия формирования цунамигенных отложений в течение этих более длительных периодов времени могли существенно изменяться, что нарушает требование однородности условий, заложенных в модель.

Несмотря на ряд естественных ограничений, развиваемый количественный подход к оценкам параметров формирования цунамигенных отложений может с успехом применяться как стартовый для получения адекватных количественных оценок цунамиопасности и риска.

В качестве примера на рис. 6 приведена совместная функция повторяемости высот цунами для Халактырки, построенная ранее [Kaistrenko et al., 2003] методом наименьших квадратов по данным об исторических цунами 1841, 1952 и 1960 гг. и 11 палеоцунами за период начиная с 236 г., без учета вероятности сохранности цунамигенных отложений.

Рис. 6 демонстрирует значимость данных палеоцунами – именно 11 палеоцунами соот-

ветствует одно значение функции повторяемости с малым значением стандартного отклонения (априорной погрешности), по сравнению с большими стандартными отклонениями для (всего) 3 сильных исторических цунами.

### Заключение

Данные о палеоцунами очень важны для получения оценок цунамиопасности (повторяемости и характерных высот) и риска с приемлемой точностью, что необходимо как для решения чисто научных задач, так и для планирования развития побережий и градостроительства в прибрежной зоне. Однако использование данных о палеоцунами непосредственно может привести к занижению оценок повторяемости, и поэтому необходимо учитывать особенности их формирования и изменений, происходящих в отложениях цунами до их фиксации.

С использованием метода максимального правдоподобия построена модель для оценок реального количества  $N$  палеоцунами (которое характеризует повторяемость цунами) и вероятности  $p$  сохранности их следов, на основе данных о количестве отложений палеоцунами в нескольких разрезах, ассоциированных с одинаковой для них высотой  $h$  над уровнем океана и временным периодом  $T$  их образования.

Модель протестирована на материалах о палеоцунами на побережье в районе Халактырки, поселка в составе г. Петропавловск-Камчатский, для четырех временных интервалов  $T$ , задаваемых четкими отложениями маркирующих пеплов извержений вулканов Ксудач в 1907 г., Авачинский в 1855 и в 1779 гг., Опала в 606 г. Оценки количества цунамигенных горизонтов для временных интервалов настоящее время – 1907 г. (Ц1 и Ц2) и 1907–1855 гг. (Ц3) являются максимально правдоподобными. Для двух других временных интервалов: 1855–1779 и 1779–606 гг. – количество выделенных прослоев Ц4–Ц5 и Ц6–Ц8 не согласуется с их распределением в 10 разрезах и этим количествам не отвечает максимум функции правдоподобия. Это объясняется как ограничениями построенной модели, связанны-

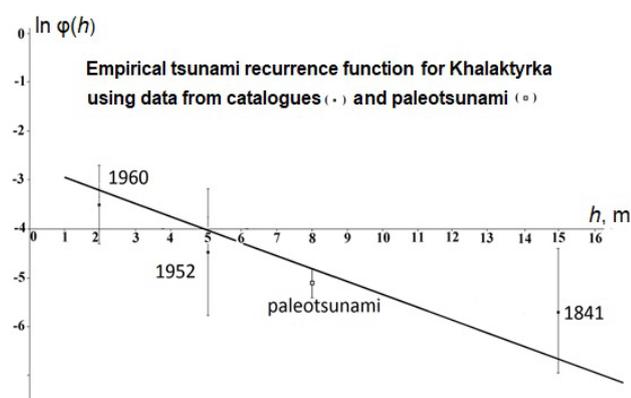


Рис. 6. Эмпирическая функция повторяемости высот цунами для Халактырки [Kaistrenko et al., 2003].

ми с заложенными в модель условиями, так и низкой вероятностью сохранения следов некоторых цунами.

Несмотря на ряд естественных ограничений, развиваемый количественный подход к оценкам параметров формирования цунамигенных отложений может с успехом применяться как стартовый для получения адекватных количественных оценок цунами-опасности и риска.

#### Благодарности

Автор благодарит анонимных рецензентов, замечания которых позволили устранить ряд недостатков.

*Работа поддержана Дальневосточным отделением РАН (проект № 18-5-003. «Катастрофические цунами в Дальневосточном регионе России»).*

#### Список литературы

1. Бобыкина В.П. Цунами как экзогенный берегоформирующий фактор // *Новые данные по геоморфологии и геологии западной части Тихого океана*. Владивосток: ТОИ ДВО АН СССР, 1990. С. 51–57.
2. Булгаков Р.Ф., Иванов В.В., Певзнер М.М., Сулержицкий Л.Д., Храмушин В.Н. Исследование следов палеоцунами для цунамирайонирования // *Физика Земли*. 1995. № 2. С. 18–27.
3. Ганзей Л.А., Разжигаева Н.Г., Нишимура Ю., Гребенникова Т.А., Кайстренко В.М., Горбунов А.О., Арсланов Х.А., Чернов С.Б., Наумов Ю.А. Осадки исторических и палеоцунами на побережье Восточного Приморья // *Тихоокеанская геология*. 2015. № 1. С. 79–95. [Ganzei L.A., Razjigaeva N.G., Nishimura Yu., Grebennikova T.A., Kaistrenko V.M., Gorbunov A.O., Arslanov Kh.A., Chernov S.B., Naumov Yu.A. Deposits of historical and paleotsunamis on the coast of Eastern Primorye // *Russian J. of Pacific Geology*. 2015, 9(1): 64–79. doi.org/10.1134/S1819714015010029]
4. Ганзей Л.А., Разжигаева Н.Г., Нишимура Ю., Гребенникова Т.А., Горбунов А.О., Кайстренко В.М., Наумов Ю.А., Лебедев И.И. Осадки цунами 1983 и 1993 годов на побережье Приморья // *Океанология*. 2017. Т. 57(4). С. 628–640 [Ganzei L.A., Razjigaeva N.G., Nishimura Yu., Grebennikova T.A., Gorbunov A.O., Kaistrenko V.M., Naumov Yu.A., Lebedev I.I. Deposits of the 1983 and 1993 tsunamis on the coast of Primorye // *Oceanology*. 2017, 57(4): 568–579. https://doi.org/10.1134/S0001437017040075]
5. Иванов В.В. Исследование влияния цунами на осадконакопление по следам цунами 4 октября 1994 года // *Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 119–128. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; т. 8).
6. Кайстренко В.М., Клячко М.А., Храмушин В.Н., Золотухин Д.Е. Оценка цунамиопасности и построение карт цунамирайонирования для побережья Сахалинской области. Проблема нормативов // *Строительная индустрия Сахалина*. 2014. № 19. С. 38–43.
7. Каплин П.А., Ионин А.С. Некоторые особенности рельефа побережья Курило-Камчатской зоны в связи с проблемой цунами // *Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР*. 1961. № 9. С. 74–88.
8. Крамер Г. *Математические методы статистики*. М.: Мир, 1975. 648 с. [Cramer H. *Mathematical Methods of Statistics*. Bombay; New-York: Asia Publ. House, 1946. 575 p.]
9. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. *Методы теории функций комплексного переменного*. М.: Наука, 1987. 688 с.
10. Левин Б.В., Носов М.А. *Физика цунами и родственных явлений в океане*. М.: Янус-К, 2005. 360 с. [Levin B.W., Nosov M.A. *Physics of Tsunamis*. 2nd ed. Springer Intern. Publ. Switzerland, 2016. 388 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24037-4]
11. Пинегина Т.К., Буржуа Д., Базанова Л.И., Брайцева О.А., Егоров Ю.О. Отложения цунами и анализ цунамиопасности на Халактырском пляже в районе Петропавловска-Камчатского, Тихоокеанское побережье Камчатки, Россия // *Сб. статей по результатам междунар. конф. «Локальные цунами: предупреждение и уменьшение риска», Петропавловск-Камчатский, 10–15 сентября 2002 г.* М.: Янус-К, 2002. С. 142–151. [Pinegina T.K., Bourgeois J., Bazanova L.I., Braitseva O.A., Egorov Yu.O. Tsunami and analysis of tsunami risk at Khalaktyrka beach region of Petropavlovsk-Kamchatsky, Pacific coast of Kamchatka. In: *Proceedings of the International workshop “Local tsunami warning and mitigation”, Petropavlovsk-Kamchatsky, September 10–15, 2002*. English book. Moscow: Ianus-K, 2002. P. 122–131.]
12. Пинегина Т.К., Разжигаева Н.Г. Исследования палеоцунами на дальневосточном побережье России // *Мировой океан. Т. I. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане*. М.: Научный мир, 2013. С. 488–498.
13. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Ильев А.Я., Кайстренко В.М. Осадки цунами Шикотанского землетрясения 1994 г. // *Океанология*. 2007. Т. 47(4). С. 622–630. [Razjigaeva N.G., Ganzei L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A., P'ev A.Ya., Kaistrenko V.M. Tsunami Deposits of the Shikotan Earthquake of 1994 // *Oceanology*. 2007, 47(4): 579–587. https://doi.org/10.1134/S0001437007040157]
14. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Ильев А.Я., Кайстренко В.М. Геологическая летопись палеоцунами на о. Шикотан (Малая Курильская гряда) в голоцене // *Вулканология и сейсмология*. 2008. № 4. С. 50–66. [Razjigaeva N.G., Ganzei L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A., P'ev A.Ya., Kaistrenko V.M. The geological record of paleotsunamis striking Shikotan Island, in the Lesser

- Kurils, during Holocene time // *J. of Volcanology and Seismology*. 2008, 2(4): 262-277. <https://doi.org/10.1134/S0742046308040040>
15. Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Кайстренко В.М., Арслано Х.А., Горбунов А.О. Проявление палеоцунами на Малой Курильской гряде в голоцене // *Тихоокеанская геология*. 2012. Т. 31, № 6. С. 48–56 [Razzhigaeva N.G., Ganzei L.A., Grebennikova T.A., Kharlamov A.A., Kaistrenko V.M., Arslanov Kh.A., Gorbunov A.O. Manifestation of Holocene Tsunamis on the Lesser Kuril Ridge // *Russian J. of Pacific Geology*. 2012, 6(6): 448-456. <https://doi.org/10.1134/S1819714012060061>]
  16. Свод правил «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования» (СП 292.1325800.2017) / Клячко М.А., Зайцев А.И., Заритовский Н.Г., Кайстренко В.М., Максимов В.В., Нуднер И.С., Пелиновский Е.Н., Рутман Ю.Л., Фильков В.Ю., Штанько Л.Ф. М.: Минстрой России, 2017. 138 с.
  17. Abe T., Goto K., Sugawara D. Relationship between the maximum extent of tsunami sand and the inundation limit of the 2011 Tohoku-oki tsunami on the Sendai Plain, Japan // *Sedimentary Geology*. 2012. Vol. 282. P. 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.05.004>
  18. Atwater B.F., Moore A.L. A tsunami about 1000 years ago in Puget Sound, Washington // *Science*. 1992. Vol. 258(5088). P. 1614–1617. doi:10.1126/science.258.5088.1614
  19. Bourgeois J., Hansen T.A., Wiberg P.L., Kauffman E.J. A tsunami deposit at the Cretaceous–Tertiary boundary in Texas // *Science*. 1988. Vol. 241(4865). P. 567–570. doi:10.1126/science.241.4865.567
  20. Bourgeois J., Pinegina T.K., Ponomareva V., Zaretskaia N. Holocene tsunamis in the southwestern Bering Sea, Russian Far East, and their tectonic implications // *GSA Bulletin*. 2006. Vol. 118(3/4). P. 449–463. <https://doi.org/10.1130/B25726.1>
  21. Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzitsky L.D., Melekestsev I.V., Bailey J. Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // *Quaternary Research*. 1997. Vol. 47. P. 125–139. <https://doi.org/10.1006/qres.1996.1876>
  22. Chagué-Goff C., Goff J., Wong H.K.Y., Cisternas M. Insights from geochemistry and diatoms to characterise a tsunami's deposit and maximum inundation limit // *Marine Geology*. 2015. Vol. 359. P. 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.11.009>
  23. Cheng W., Weiss R. On sediment extent and run-up of tsunami waves // *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. Vol. 362. P. 305–309. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.12.004>
  24. Dawson A.G., Long D., Smith D.E. The Storegga slides: evidence from eastern Scotland for a possible tsunami // *Marine Geology*. 1988. Vol. 82. P. 271–276. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(88\)90146-6](https://doi.org/10.1016/0025-3227(88)90146-6)
  25. Einsele G., Chough S.K., Shiki T. Depositional events and their records – an introduction // *Sedimentary Geology*. 1996. Vol. 104. P. 1–9. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(95\)00117-4](https://doi.org/10.1016/0037-0738(95)00117-4)
  26. Geist E.L., Parsons T. Distribution of tsunami interevent times // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35, L02612. <https://doi.org/10.1029/2007GL032690>
  27. HTDB/WLD: *Historical Tsunami Database for the World Ocean*. URL: <http://tsun.sccc.ru/htdbpac/> (accessed: 15.09.2014).
  28. Jaffe A.E., Gelfenbaum G. A simple model for calculating tsunami flow speed from tsunami deposits // *Sedimentary Geology*. 2007. Vol. 200(3–4). P. 347–361. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.013>
  29. Kaistrenko V. Tsunami recurrence versus tsunami height distribution along the coast // *Pure and Applied Geophysics*. 2011. Vol. 168(11). P. 2065–2069. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0288-0>
  30. Kaistrenko V. Tsunami recurrence function: Structure, methods of creation, and application for tsunami hazard estimates // *Pure and Applied Geophysics*. 2014. Vol. 171. P. 3527–3538. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0791-1>
  31. Kaistrenko V.M., Pinegina T.K., Klyachko M.A. Evaluation of tsunami hazard for the Southern Kamchatka coast using historical and paleotsunami data // *Submarine Landslides and Tsunamis: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Istanbul, Turkey, 23–26 May 2001* / eds.: A.C. Yalciner, E. Pelinovsky, C.E. Synolakis, E. Okal. Kluwer Publ., Springer, 2003. P. 217–228.
  32. Kastens K.A., Cita M.B. Tsunami-induced sediment transport in the abyssal Mediterranean Sea // *GSA Bulletin*. 1981. Vol. 92(11). P. 845–857. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1981\)92<845:TSTITA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1981)92<845:TSTITA>2.0.CO;2)
  33. Keating B.H. Status of tsunami science research and future directions of research // *Science of Tsunami Hazards*. 2006. Vol. 24(5). P. 285–395.
  34. Keating B.H., Hellsley C.E., Wanink M., Walker D. Tsunami deposit research: Fidelity of the tsunami record, ephemeral nature, tsunami deposits characteristics, remobilization of sediment by later waves, and boulder movements // *The Tsunami Threat – Research and Technology* / ed. by Nils-Axel Mörner. Rijeka, Croatia: InTech, 2011. P. 389–422. <https://doi.org/10.5772/14885>
  35. MacInnes B.T., Bourgeois J., Pinegina T.K., Kravchunovskaya E.A. Tsunami geomorphology: Erosion and deposition from the 15 November 2006 Kuril Island tsunami // *Geology*. 2009a. Vol. 37(11). P. 995–998. doi: <https://doi.org/10.1130/G30172A.1>
  36. MacInnes B.T., Pinegina T.K., Bourgeois J., Razzhigaeva N.G., Kaistrenko V.M., Kravchunovskaya E.A. Field survey and geological effects of the 15 November 2006 Kuril tsunami in the middle Kuril Islands // *Pure and Applied Geophysics*. 2009b. Vol. 166(1–2). P. 3–36 [https://doi.org/10.1007/978-3-0346-0064-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-0346-0064-4_2)
  37. Marinatos S. The volcanic destruction of Minoan Crete // *Antiquity*. 1939. Vol. 13. P. 425–439.
  38. Minoura K., Nakata T. Discovery of an ancient tsunami deposit in coastal sequences of southwest Japan: verification of a large historical tsunami // *Island Arc*. 1994.

- Vol. 3. P. 66–72. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1994.tb00006.x>
39. Minoura K., Nakaya S. Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: some examples from northeast Japan // *The Journal of Geology*. 1991. Vol. 99. P. 265–287.
40. Moore G.W., Moore J.G. Deposits from a giant wave on the island of Lanai, Hawaii // *Science*. 1984. Vol. 226. P. 1312–1315. doi:10.1126/science.226.4680.1312
41. Moor J.G., Moore G.W. Large-scale bedforms in boulder gravel produced by giant waves in Hawaii // *Geological Society of America Special*. 1986. Vol. 229. P. 101–110. <https://doi.org/10.1130/SPE229-p101>
42. NGDC: *Tsunami Data and Information*. URL: [https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\\_db.shtml](https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml) (accessed: 29.09.2019). doi:10.7289/V5PN93H7
43. Oliveira M.A., Andrade C., Freitas M.C., Costa P. Using the historical record and geomorphological setting to identify tsunami deposits in the southwestern coast of Algarve (Portugal) // *2nd Tsunami Field Symposium: Abstract Book*. Ostuni, Italy, 2008. P. 85–88.
44. Paskoff R. Likely occurrence of a mega-tsunami in the Middle Pleistocene, near Coquimbo, Chile // *Revista Geológica de Chile*. 1991. Vol. 18(1). P. 87–91. doi:10.5027/andgeoV18n1-a08
45. Pinegina T., Bourgeois J., Bazanova L., Melekestsev I., Braitseva O.A. Millennial – scale record of Holocene tsunamis on the Kronotskiy Bay coast, Kamchatka, Russia // *Quaternary Research*. 2003. Vol. 59. P. 36–47. [https://doi.org/10.1016/S0033-5894\(02\)00009-1](https://doi.org/10.1016/S0033-5894(02)00009-1)
46. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Ivanova E.D., Kharlamov A.A., Kaistrenko V.M., Shishkin A.A. Coastal sedimentation associated with the Tohoku Tsunami of 11 March 2011 in South Kuril Islands, NW Pacific Ocean // *Pure and Applied Geophysics*. 2013. Vol. 170(6–8). P. 1081–1102. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0478-4>
47. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Ivanova E.D., Kharlamov A.A., Kaistrenko V.M., Arslanov Kh.A., Chernov S.B. The Tohoku Tsunami of 11 March 2011: The key event to understanding tsunami sedimentation on the coasts of closed bays of the Lesser Kuril Islands // *Pure and Applied Geophysics*. 2014. Vol. 171(12). P. 3307–3320. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0794-y>
48. Soulsby R., Smith D.E., Ruffman A. Reconstructing tsunami run-up from sedimentary characteristics: A simple mathematical model // *Sixth Intern. Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Process, New Orleans, Louisiana, United States, May 13–17, 2007. Coastal Sediments '07*. New Orleans, 2007. P. 1075–1088.
49. Spiske M., Piepenbreier J., Benavente C., Bahlburg H. Preservation potential of tsunami deposits on arid siliclastic coasts // *Earth Science Reviews*. 2013. Vol. 126. P. 58–73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.07.009>
50. Srisutam Ch., Wagner J-F. Reconstructing tsunami run-up from the characteristics of tsunami deposits on the Thai Andaman Coast // *Coastal Engineering*. 2010. Vol. 57. P. 493–499. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.12.001>
51. Szczucin'ski W. The post-depositional changes of the onshore 2004 tsunami deposits on the Andaman Sea coast of Thailand // *Natural Hazards*. 2012. Vol. 60. P. 115–133. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9956-8>
52. Witter R.C., Jaffe B., Zhang Y., Priest G. Reconstructing hydrodynamic flow parameters of the 1700 tsunami at Cannon Beach, Oregon, USA // *Natural Hazards*. 2012. Vol. 63. P. 223–240. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9912-7>

Об авторе

КАЙСТРЕНКО Виктор Михайлович (ORCID 0000-0003-1026-2509), доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории цунами – Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.

## The manifestation of tsunami of August 1, 1940 in the Kamenka settlement, Primorye (new data concerning the old tsunami)

© 2019 Victor M. Kaistrenko\*<sup>1</sup>, Nadezhda G. Razjigaeva<sup>2</sup>, Larisa A. Ganzey<sup>2</sup>,  
Alexey O. Gorbunov<sup>1</sup>, Yuichi Nishimura<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>2</sup>Pacific Institute of Geography, FEB RAS, Vladivostok, Russia

<sup>3</sup>Institute of Volcanology and Seismology, Hokkaido University, Sapporo, Japan

\*E-mail: vict-k@mail.ru

**Abstract.** One of the most powerful earthquakes in the Sea of Japan area happened on August 1, 1940. This earthquake had been accompanied by a large tsunami in the Northern part of the sea. The article contains the description of an unusual feature of the 1940 Japan Sea tsunami manifestation: maximum tsunami run-up heights were observed in the far-field zone (Primorye coast, Russia), not in the near-field zone (Hokkaido coast, Japan). Description of the striking manifestation of this tsunami with run-up heights up to 5 m in the vicinity of the Kamenka settlement in Primorye is based on the information from eyewitness and their descendants. These data were not mentioned in the tsunami catalogues and are thus news for tsunami science. Three torpedo motor-boats had been displaced by the tsunami from the Kamenka harbor to the peat area far from the sea. Corresponding map is shown.

**Keywords:** Sea of Japan, Primorye, Hokkaido, Kamenka settlement, earthquake, tsunami, run-up height.

*For citation:* Kaistrenko V.M., Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Gorbunov A.O., Nishimura Yu. The manifestation of tsunami of August 1, 1940 in the Kamenka settlement, Primorye (new data concerning the old tsunami). *Geosystems of Transition Zones*, 2019, vol. 3, no. 4. P. 417–422 (In English, abstract in Russian).  
<https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.417-422>

## Проявления цунами 1 августа 1940 г. в Каменке, Приморье (новые данные о давнем историческом цунами)

В.М. Кайстренко<sup>1</sup>, Н.Г. Разжигаева<sup>2</sup>, Л.А. Ганзей<sup>2</sup>, А.О. Горбунов<sup>1</sup>, Ю. Нисимура<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup>Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>3</sup>Институт вулканологии и сейсмологии, Университет Хоккайдо, г. Саппоро, Япония

\*E-mail: vict-k@mail.ru

**Реферат** (расширенный). В статье изложены результаты исследования исторического цунами 1940 г., одного из наименее изученных на побережье России. Это цунами было вызвано сильным землетрясением в акватории Японского моря с магнитудой  $M = 7.5$ , которое произошло 1 августа 1940 г. в 15:08:24 GMT. Цунами, сопровождавшееся опасными высотами заплесков в северной части Японского моря, было достаточно хорошо обследовано на побережье Японии (53 места) и очень фрагментарно на побережье Кореи (4 места) и на побережье России (7 мест). Максимальные заплески в ближней зоне на побережье Японии достигали 3 м в трех местах на о. Рисири и в порту Томамаэ на восточном побережье Хоккайдо. На остальных участках побережья Хоккайдо заплески были в основном менее 2 м. Максимальный заплеск, равный 3.5 м, был зафиксирован в Приморье в Рудной Пристани, т.е. в дальней зоне, что было отмечено исследователями как необычная особенность этого цунами.

В процессе изучения проявлений палео- и исторических цунами на побережье Приморья, проводимых с 2010 г. специалистами Тихоокеанского института географии ДВО РАН с участием сотрудников Института морской геологии и геофизики ДВО РАН и специалистов других учреждений, удалось обнаружить надежные свидетельства, что заплеск этого цунами в пос. Каменка достигал 5 м над средним уровнем моря (точка 595; 05.07.2010; 44°27'18.99" N, 136° 1'19.74" E). Этот факт свидетельствует о еще большем контрасте в проявлениях этого цунами в ближней и дальней зонах.

Впечатляющее проявление этого цунами осталось в памяти жителей пос. Каменка. Неожиданная атака цунами в ночное время создала опасную ситуацию в порту и низинной части поселка. Значительная часть улиц Заречная и Набережная, расположенных в низинной части, оказались затопленными морской водой. Волна оторвала суда от причальных сооружений и вынесла два торпедных катера далеко от моря на торфяник, расположенный между руслами рек Опричинка и Прямая Падь, а один катер перенесла через дорогу на Пластун. Удивительно, что суда не получили серьезных повреждений и позже были возвращены к морю с помощью тракторов. Несмотря на панику, вызванную ночной атакой цунами, пропавших и получивших серьезные ранения не было.

Данные о проявлениях цунами 1940 г. в Каменке, полученные авторами в процессе опроса очевидцев этого цунами и замеров заплеска, являются значимыми, они отсутствуют в каталогах цунами и не упоминаются в научной периодике и после публикации могут быть использованы в исследованиях цунами.

**Ключевые слова:** Японское море, Приморье, Хоккайдо, Каменка, землетрясение, цунами, высота наката.

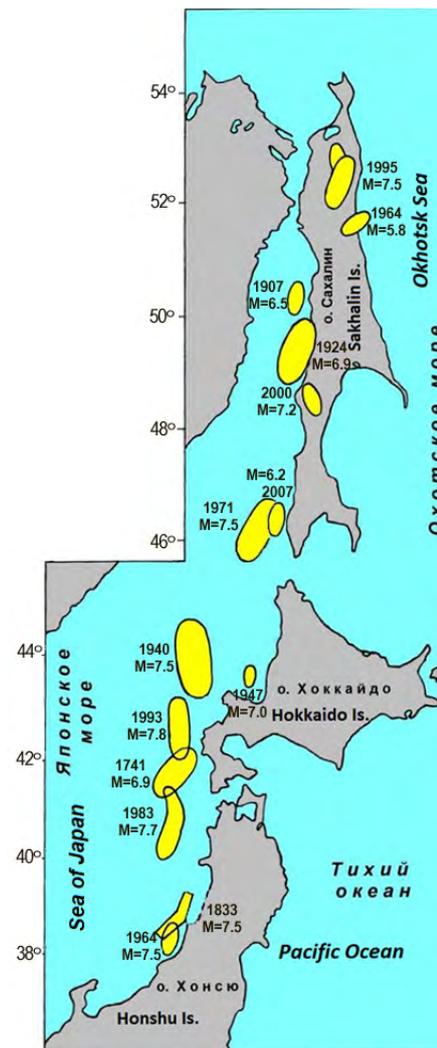
*Для цитирования:* Кайстренко В.М., Разжигаета Н.Г., Ганзей Л.А., Горбунов А.О., Нисимура Ю. Проявления цунами 1 августа 1940 г в Каменке, Приморье (новые данные о давнем историческом цунами). *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 4. С. 417–422. (На англ. яз., реферат на русском). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.417-422>

### A short sketch on Tsunamis in the Sea of Japan (Introduction)

Sea of Japan is really a closed basin, and all tsunamis from Pacific sources arrive weakened through the narrow straits. Because of it, tsunami activity in the Sea of Japan is created by the tsunami sources within the area. All known large earthquakes that had caused tsunamis are located along the Eastern coast of the sea near Japan (Fig. 1). Information related to the tsunamis in the Sea of Japan is available in books and articles [Soloviev, Go, 1984; Polyakova, 1988; Go et al., 1985; Gorbunova et al., 1997; The 2 August, 2007 Nevel'sk... , 2009] and Internet catalogues [HTDB/WLD: Historical Tsunami Database...; NGDC: Tsunami Data...].

Since 1940, several large earthquakes with tsunamis had happened. Information about prior tsunamis is fragmentary.

The Tsunami of 1940 (Shakotan-Oki Tsunami) has been caused by the earthquake with magnitude  $M = 7.5$  on August 1<sup>st</sup>, 15 h 8 m 24 s, GMT. Its source was located near the N-W coast of Hokkaido (Fig 1). Maximum run-up heights in the near-field zone equal to 3 m were measured at three locations on the coast of the Rishiri Island and in the port of Tomamae, on the Western Hokkaido coast. Run-up heights at all the other locations along the Hokkaido coast were mostly lower than 2 m (Fig 2).



**Fig. 1.** Sources of the largest earthquakes in the Sea of Japan area [Tikhonov, 2006].

Generally, this tsunami had been investigated rather well in Japan (53 locations) and very fragmentarily on the Korean coast (4 locations) and on the Russian coast (7 locations).

Unexpectedly, maximum run-up height 3.5 m had been measured in Rudnaya Pristan' (Tetyuhe), i.e., in the far-field zone. Earlier, T. Hatory [Hatory, 1991]

noticed that run-ups in the far-field zone of this tsunami are anomalously high. For example, maximum run-up height on the Korean coast was 2 m (Ullungdo Is.). Detailed description of this tsunami is given in [Soloviev, Go, 1984; Miyabe, 1940, 1941; Hatori, 1969].

The source of tsunami on June 16, 1964 was located opposite the port of Niigata. Tsunami heights in the nearest coast had reached 6 m, but generally, this tsunami was not large. On the Russian and Korean coasts, this tsunami was detected by the tide gauges only.

Tsunami on September 6, 1971 was created by an earthquake with a 7.5 magnitude, located near the Moneron Island. Maximum heights up to 2 m were observed on the Southern part of the Sakhalin coast of the Tatar Strait. Tsunami heights on the Japan coast were lower than 0.3 m [Shchetnikov, 1981].

Large tsunami on May 26, 1983 (Nihonkai-Chubu tsunami) was caused by an earthquake with a 7.8 magnitude, located near Akita prefecture, Honshu Island. The largest tsunami heights had been observed in the near-field zone (14.93 m in Minehama and 12.7 m near Noshiro, ...). Dangerous tsunami heights have been observed in the far-field zone on the Hokkaido coast (3.5 m in the Matsumae port), on the Korean coast (5 m on the Ullungdo Island, coast, 4 m in the port of Imwon, ...), on the Primorye coast (4.8 m in Rudnaya Pristan' port, 5 m in the Lidovka bay, ...). Detailed information was collected in [Polyakova, 1988; Go et al., 1985; Hatori, 1983; Abe, Ishii, 1987].

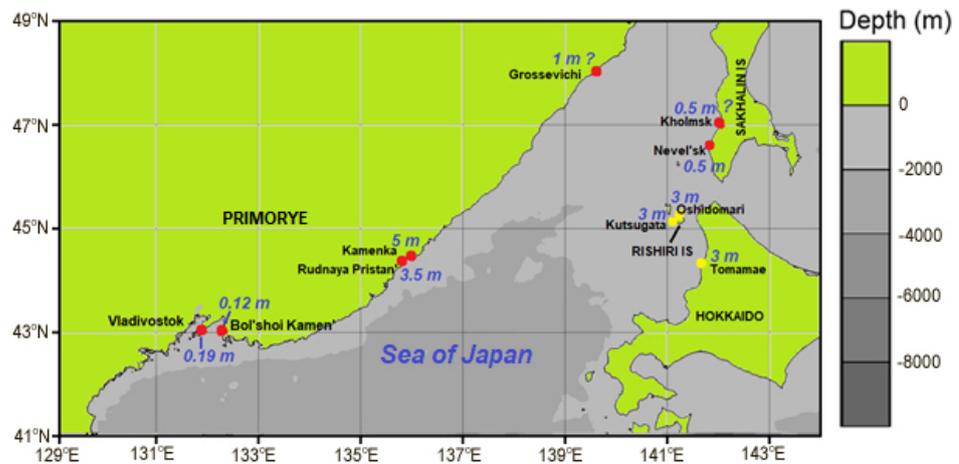


Fig. 2. Maximum 1940 tsunami run-up heights on the Japan coast (yellow circles) and run-up heights registered on the Russian coast (red circles).

Large tsunami on July 12, 1993 (Hokkaido Nansei-Oki Tsunami) was generated by an earthquake with a 7.7 magnitude and an epicenter located close to Okushiri Island. Maximum tsunami heights have been observed on the coast of the Okushiri Island (32 m) and Hokkaido coast (19 m in Hamatsumae). Tsunami heights on the coast of Korea and Primorye, in the far-field zone, were generally lower than the 1983 tsunami heights: 2.39 m in the port of Imwon, 3.78 m in the port of Rudnaya Pristan' and 4.43 m in the Kit bay. On the Sakhalin coast, this tsunami was detected by the tide gauges only. Manifestation of this tsunami on the Japan coast has been described in several Japanese sources. Detailed description of the manifestation of this tsunami on the Primorye coast is contained in the [Gorbunova et al., 1997].

Moderate earthquake happened on August 2, 2007 in the Tatar Strait near the Western coast of the Sakhalin Island. In spite of rather small magnitude ( $M_w = 6.2$ ), tsunami caused by this earthquake was not small. Highest run-up of 3.2 m was observed in the vicinity of the Zavety Il'icha settlement. Tsunami heights along the 100 km part of the South-Western coast of the Sakhalin Island locally exceeded 1 m [The 2 August, 2007 Nevel'sk... , 2009].

### Manifestation of the 1940 tsunami in Kamenka

Kamenka settlement is located on the high level plateau on the coast of the Oprichnik bay in the Sea of Japan. Joint mouths of Oprichninka and Pryamaya Pad' rivers make a natural harbor equipped with moorings (Fig. 3).

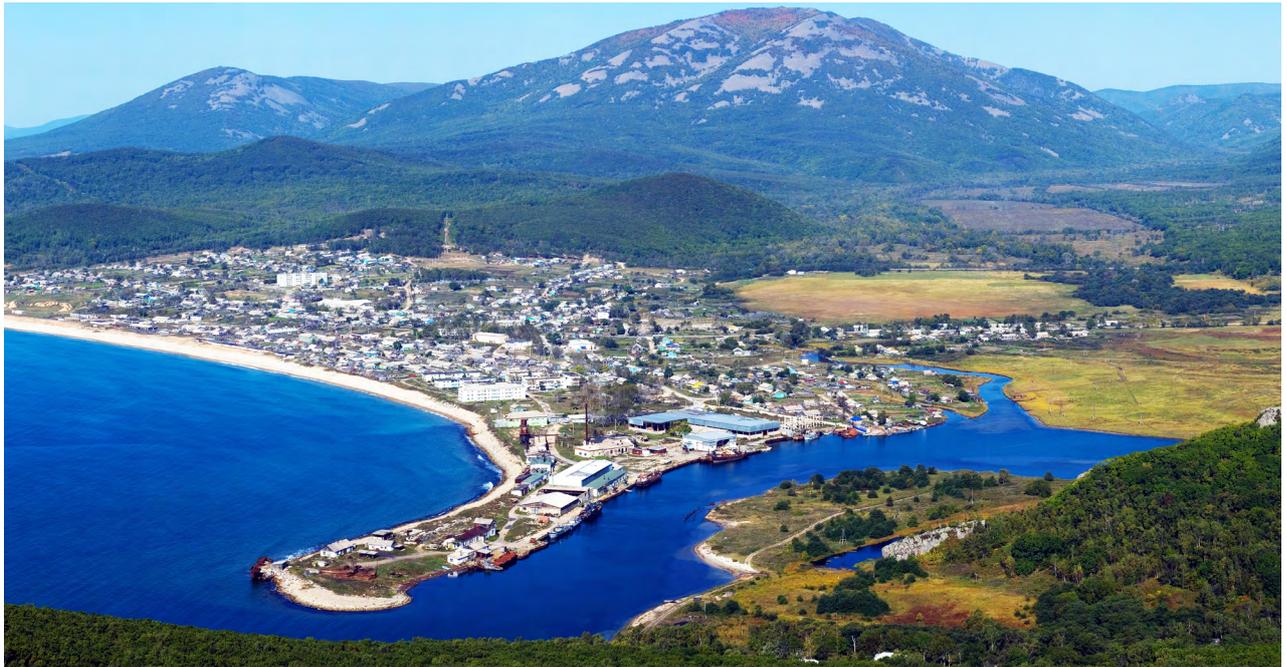


Fig. 3. General view of the Kamenka settlement. Photography by S. Kondrashkin

Description of the striking manifestation of this tsunami with run-up heights of up to 5 m in the vicinity of the Kamenka settlement in Primorye has been based on the information received from eyewitness and their descendants.

On the evening of August 1, three torpedo motor-boats came in Kamenka harbor. Tsunami attack was unexpected, and around 1 AM (August 2, local time), the fish-factory sounded the alarm. All the three torpedo motor-boats had been displaced by the tsunami, without any serious damage, to the peat area between rivers Oprichninka and Pryamaya Pad', far from the sea. One of the torpedo motor-boats had been transported to a place behind the road to Plastun. Later, all the torpedo motor-boats were returned to the sea by tractors (Fig. 4).

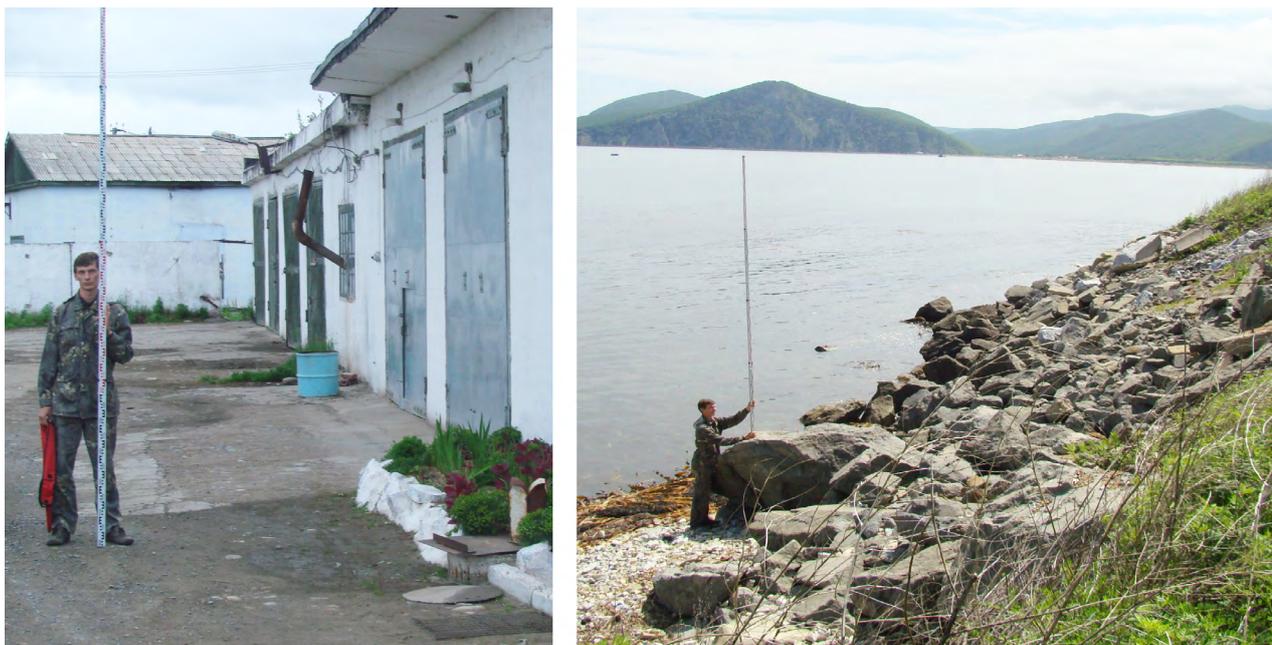
One Kawasaki boat had been displaced to the tent with seasonal workers, creating a dangerous situation. Workers managed to escape by moving to higher ground. Big parts of the Zarechnaya street and Naberezhnaya street, located close to the Pryamaya Pad' river, had been

submerged in sea water. Fish Factory building in the port (now it is Fire Station) had been flooded up to the middle of first story windows. This information was used to measure the tsunami height (Figs. 4, 5) equal to 5 m relatively to the mean sea level (position 595; July 05, 2010; 44°27'18.99" N, 136° 1'19.74" E).

In spite of panic caused by the nighttime tsunami attack, no one was lost or seriously injured.



Fig. 4. Map of the Kamenka vicinity. The red dashed line shows the boundary of the flooded part of the settlement, located close to the Pryamaya Pad' river.



**Fig. 5.** Measurement of the tsunami height as position of the funnel in the middle of the former window of the fire station building, relatively to the mean sea level. *Photography by V. Kaistrenko*

### Conclusions

It is well known that the manifestation of the tsunami of August 1, 1940 was characterized by one unusual feature: maximum run-up height of 3.5 m had been detected in Rudnaya Pristan' (Tetyuhe), i.e., in the far-field zone, not in the near-field zone. In the course of our research of the Primorye coast tsunami, we uncovered evidence that tsunami height in Kamenka settlement, also in the far-field zone, had reached 5 m. This further signifies the contrasting tsunami heights between the far-field and the near-field zones.

These data, along with the description of the striking manifestation of this tsunami in the vicinity of the Kamenka settlement, were not mentioned in the tsunami catalogues and thus present an unexpected phenomenon for tsunami science.

### Acknowledgments

We would like to thank the eyewitnesses of the 1940 tsunami N.A. Degasyuk and O.I. Degasyuk (interviewed in Summer'2010) and vice-mayor of Kamenka, E.I. Yakovenko, who had collected materials related to Kamenka history, A.N. Guzhvin for interesting information and S. Kondrashkin for the excellent photography of the Kamenka settlement, and D. Wright for correcting the English text.

*The work was made possible with support of the Far East Division of RAS "Catastrophic tsunamis in the Far East Region of Russia" (scientific project no. 18-5-003).*

### Благодарности

Мы благодарим очевидцев цунами 1940 г. Н.А. Дегасюк и О.И. Дегасюк за интервью (лето 2010 г.), вице-мэра Каменки Е.И. Яковенко, собравшую материал по истории Каменки, А.Н. Гужвина за интересную информацию, С. Кондрашкина за великолепную фотографию пос. Каменка, Д. Райт за коррекцию английского текста статьи.

*Работа была поддержана Дальневосточным отделением РАН (проект № 18-5-003. «Катастрофические цунами в Дальневосточном регионе России»).*

### References

1. Abe K., Ishii H. **1987**. Distribution of maximum water levels due to the Japan Sea Tsunami on 26 May 1983. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*. 43: 169–182. <https://doi.org/10.1007/BF02109217>
2. Go Ch. N., Ivashchenko A.I., Simonov K.V., Soloviev S.L. **1985**. Manifestation of the Japan Sea tsunami of the 26 May, 1983 on the USSR coast. In: *Tsunami run-up on the coast*. Gorkiy: IAP AS USSR, p. 171–180. (In Russian)
3. Gorbunova G.V., Didenko G.V., Dyachenko V.D., Nagornyh T.V., Poplavskiy A.A., Poplavskaya L.N. **1997**. The survey of the tsunami 12–13 July, 1993 on the Primorye coast. In: *Concrete Tsunami Manifestation. Tsunamis of the 1993 and 1994 on the Russian coast*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG FEB RAS. 8: 7–28. (Geodynamics of tectonosphere of the Pacific-Eurasia conjunction zone: in 8 vol.). (In Russian)
4. Hatori T. **1969**. A study of the wave source of tsunami generated off west Hokkaido on Aug. 2, 1940. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo Univ*. 47: 1063–1072.

5. Hatori T. **1983**. Tsunami magnitude and source area of the Nihonkai-Chubu (the Japan Sea) Earthquake in 1983. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo Univ.* 58: 723–734. (Text in Japanese, abstract and figures and tables are in English)
6. Hatori T. **1991**. Distribution of Tsunami Heights in the USSR and Korea for Tsunamis generated in the Japan Sea. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo Univ.* 66: 571–584 (Text in Japanese, abstract and figures and tables are in English)
7. *HTDB/WLD: Historical Tsunami Database for the World Ocean*. URL: <http://tsun.sccc.ru/htdbpac/> (accessed: 15.09.2014)
8. Miyabe N. **1940**. Tsunami associated with the Northern Japan Sea earthquake of Aug. 2, 1940. *Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan)*. 12(12): 535–556 (In Japanese)
9. Miyabe N. **1941**. Tsunami associated with the earthquake of August 2, 1940. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo Univ.* 19: 104–114 (In Japanese, abstract in English)
10. *NGDC: Tsunami Data and Information*. URL: [https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\\_db.shtml](https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml) (Accessed: 29.09.2019). doi:10.7289/V5PN93H7
11. Polyakova A.M. **1988**. *Tsunami of May 26, 1983 in Primorye and its effects*. Vladivostok: POI FEB RAS. 37 p. (In Russian)
12. Shchetnikov N.A. **1981**. *Tsunamis*. M.: Nauka. 88 p. (In Russian)
13. Soloviev S.L., Go Ch.N. **1984**. *Catalogue of tsunamis on the western shore of the Pacific Ocean (173–1968)*. Canada Inst. for Scientific and Techn. Inform. Ottawa, Ontario, Canada: National Res. Council. 447 p. (Canadian Translation of Fisheries and Aquatic Sciences; no. 5077). Translated from Soloviev S.L., Ch.N. Go. **1974**. *A catalogue of tsunamis on the western shore of the Pacific Ocean (173–1968)*. Moscow: Nauka. 310 p. (In Russian)
14. *The 2 August, 2007 Nevelsk Sakhalin Island earthquake and tsunami*. Ed. by B.W. Levin, I.N. Tikhonov. **2009**. Moscow: Yanus-K. 204 p. (In Russian)
15. Tikhonov I.N. **2006**. Large earthquakes in the Sakhalin district: investigations and predictions. *Vestnik DVO RAN*. 1: 67–80. (In Russian)

#### About Authors

KAISTRENKO Victor Mikhailovich (ORCID 0000-0003-1026-2509), Dr Sci. Phys. and Math., Leading researcher, Tsunami laboratory, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk; RAZJIGAEVA Nadezhda Glebovna (ORCID 0000-0001-7936-1797), Dr Sci. Geogr, Chief Researcher, Laboratory of paleogeography and geomorphology, Pacific Institute of Geography, FEB RAS, Vladivostok; GANZEY Larisa Anatolyevna (ORCID 0000-0002-2538-6603), Cand. Sci. Geogr., Leading researcher, Laboratory of paleogeography and geomorphology, Pacific Institute of Geography, FEB RAS, Vladivostok; GORBUNOV Alexey Olegovich (ORCID 0000-0002-5903-6660), Cand. Sci. Geogr., Senior researcher, Laboratory of coastal systems, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk; NISHIMURA Yuichi (ORCID ID 0000-0002-3835-0343), PhD, Associate Professor, Institute of Volca-nology and Seismology, Hokkaido University, Sapporo, Japan.

## О новом типе эолового морфогенеза на вулканогенных берегах (о. Итуруп, Большая Курильская гряда)

© 2019 В. В. Афанасьев

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

*E-mail: vvasand@mail.ru,*

**Реферат.** Рассмотрены основные причины формирования избытка наносов в береговой зоне, объясняющего эоловую аккумуляцию ближнего переноса на берегах разного типа. Обосновано выделение нового типа эолового морфолитогенеза на вулканогенных берегах, связанного с поступлением в зону волновой переработки большого количества пирокластического материала при эксплозивных извержениях среднего–позднего голоцена. Показано, что возраст таких дюн коррелирует с возрастом вулканических пемзово-тефровых отложений и никак не связан с установленными периодами высокого либо низкого стояния уровня моря.

**Ключевые слова:** береговые дюны, эксплозивное извержение вулкана, тefрохронология, субаэральный пляж, уровень моря, о. Итуруп.

*Для цитирования:* Афанасьев В.В. О новом типе эолового морфогенеза на вулканогенных берегах (о. Итуруп, Большая Курильская гряда). *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 4. С. 423–427.  
<https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.423-427>

## A new type of aeolian morphogenesis on volcanic shores (Iturup Island, Great Kuril Ridge)

*Victor V. Afanas'yev*

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

*E-mail: vvasand@mail.ru,*

**Abstract.** The main reasons for the formation of sediments excess in the coastal zone have been considered to explain the aeolian accumulation of soil close transfer on different types of shores. The grounds are presented for division of a new type of aeolian morpholithogenesis on volcanic shores associated with a large amount of pyroclastic material entering to the wave processing zone during explosive eruptions in the Middle – Late Holocene. It has been established that the age of such dunes correlates with the age of deposits of volcanic pumice and tephra, but it is not concern to well-known periods of high or low sea level.

**Keywords:** coastal dunes, explosive volcanic eruption, tephrochronology, subaerial beach, sea level, Iturup Island.

*For citation:* Afanas'yev V.V. A new type of aeolian morphogenesis on volcanic shores (Iturup Island, Great Kuril Ridge). *Geosystems of Transition Zones*, 2019, vol. 3, no. 4, pp. 423–427. (In Russian)  
<https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.423-427>

### Введение

Палеогеографические модели развития морских побережий вообще и дальневосточных в частности, по нашему мнению, в не-

достаточной степени учитывают особенности собственно берегового морфолитогенеза. Многих недоразумений, связанных с оценками амплитуды и направленности изменений

уровня моря, определениями функциональных и причинно-следственных связей в схемах, описывающих результаты проявлений берегового морфолитогенеза, можно было бы избежать при должном внимании к специфике собственно береговых процессов [Игнатов, 2006].

Эоловую аккумуляцию так называемого ближнего переноса на берегах морей и океанов можно отнести именно к этой категории процессов. В вопросах происхождения, морфолитодинамики и цикличности эолового морфолитогенеза на побережье отсутствует ясность, несмотря на огромное количество публикаций, посвященных проблеме, в том числе аналитических обзоров [Tamura et al., 2016; Provoost et al., 2011; Szkornik et al., 2008].

В России исследования побережий преимущественно по приустьевым районам крупных рек положили начало регрессивной теории формирования дюн (при падении уровня моря) [Короткий, 2007; Короткий и др., 1996; Разжигаева, Ганзей, 2006]. А на примере побережий с активным размывом берегов сформировалось мнение об активизации эолового рельефообразования при подъеме уровня моря [Бадюкова, Соловьева, 1997].

Справедливости ради следует отметить, что в последнее время появилось понимание того, что эоловые процессы в береговой зоне связаны с наличием наносов в субаэральной части пляжа и контролируются колебаниями уровня моря разного знака [Aagaard et al., 2007; Бадюкова, Соловьева, 2015]. Более того, недавние наблюдения на берегах Нидерландов показали, что нет никакой существенной корреляции между изменчивостью годовых ветровых условий и ежегодными изменениями объема дюн. И наоборот, обнаружена значительная временная корреляция между изменчивостью годового состояния пляжа и изменением объема дюн [Vries et al., 2012, 2014]. Это говорит о том, что традиционные эоловые морфолитодинамические модели, разработанные для пустынного эолового морфолитогенеза, переоценивают важность изменчивости ветровых условий для эоловых скоростей переноса через пляж в направлении авандюн и береговых террас, особенно в условиях муссонного климата.

По нашему мнению, цикличность эолового рельефообразования на побережье связана с изменениями баланса наносов в береговой зоне, определяемыми, главным образом, колебаниями уровня моря. Основные закономерности эолодинамики на берегах дальневосточных морей в голоцене ранее были представлены нами [Афанасьев, 1992] следующим образом. На участках побережья, характеризующихся большими объемами выноса обломочного материала с суши, развитие процессов эоловой аккумуляции связывается с понижением уровня моря. Например, в районе зал. Виахту на северном Сахалине формирование эоловой толщи мощностью 2.0–2.5 м на поверхности 20-метровой аллювиально-морской верхнеплейстоценовой террасы началось одновременно с молодым эвтрофным торфяником на эстуарно-лагунной толще залива ( $440 \pm 83$  кал. л.н., ДВГУ-187;  $440 \pm 85$  кал. л.н., ДВГУ-178) [Афанасьев, 1992].

На побережье, где поступление наносов в береговую зону обеспечивается преимущественно морскими гидродинамическими процессами, эоловые отложения формируются в период усиления размыва при подъеме уровня моря. Мощные дюнные отложения сахалинского побережья Амурского лимана начали формироваться на аккумулятивных сегментах абразионно-аккумулятивных систем именно в начале второй фазы волновой аккумуляции ( $4615 \pm 579$  кал. л.н., ДВГУ-109) [Афанасьев, 1992].

Некоторые современные формы эолово-прибрежной аккумуляции обязаны своим происхождением изменениям гидродинамической активности в последние несколько десятилетий, при условии унаследованности этих процессов на участках развития. Это относится, в частности, к дюнам на побережье Сахалинского залива, Татарского пролива, северо-восточного Сахалина, Курильских островов, южного Приморья. Современные эоловые отложения наблюдаются здесь на отметках до +25 м, активно формируются авандюны высотой до 8–10 м. Высокой мобильностью песчаного материала объясняется также, в частности, наличие на побережье

Японии эоловых отложений береговых линий раннего–среднего голоцена.

В данной работе предлагается обратить внимание на ранее практически не изученный эоловый морфолитогенез, связанный с волновой переработкой пемзово-пирокластического материала при эксплозивных извержениях в неоплейстоцене и голоцене.

Эоловые покровы в вулканических центрах изучаются достаточно давно [Ботвинкина, 1974; Porter, 1997; Tanino, 2000]. Однако в нашем случае речь идет о формировании дюн в результате избытка наносов в береговой зоне при волновой переработке легко дезинтегрируемого пирокластического материала.

На о. Итуруп (Курильская гряда) в позднем неоплейстоцене–голоцене возникли четыре крупные кальдеры обрушения, при формировании которых было извержено около 450 км<sup>3</sup> преимущественно дацитовый пирокластик [Мелекесцев, 2005].

Нами установлено, что в среднем–позднем голоцене, после поднятия уровня моря до отметок близких к современным, в центральной части о. Итуруп произошло отложение по крайней мере двух крупных серий пирокластик, последняя из которых датирована 1050 ± 70 л.н., ЛУ-8685. В основании же разреза высокого морского берегового уступа обнаружены вулканотектонические дислокации со слоем пляжного материала. Отнести эти дислокации к атлантической стадии голоцена, периоду максимального подъема уровня моря, позволяет ракушечный материал из отложений древнего пляжа: <sup>14</sup>C 6220–6420 кал. л.н. (Lu-9223) и 7550–7690 кал. л.н. (Lu 9241) [Afanas'ev et al., 2019].

По мнению предшественников, дюны с серией маломощных погребенных почв на Охотоморской стороне перешейка Ветровой сопоставляются с дюнами второй генерации

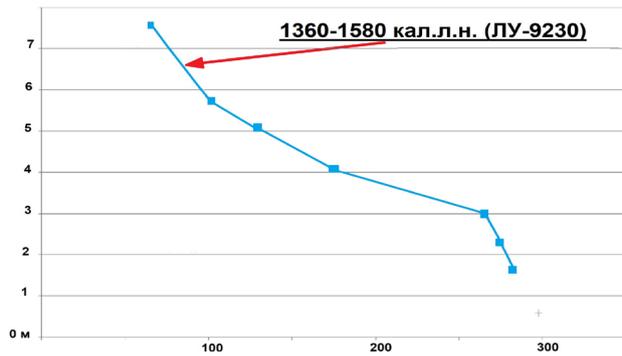
о. Кунашир – <sup>14</sup>C 1214 ± 79 кал. л. н. (ГИН-7884) [Короткий и др., 1996]. На тихоокеанской стороне перешейка тянется гряда дюн малого ледникового периода [Разжигаяева, Ганзей, 2006].

Наши исследования показали, что Охотоморское побережье перешейка Ветровой представляет собой цокольную террасу, выработанную в пемзах и перекрытую эоловыми отложениями мощностью до 25–30 м (рис. 1). Уклоны поверхности погребенного под дюнами пемзового бенча в 300–400-метровой полосе побережья составляют 1.4–1.6° (рис 2). В средней части эоловых отложений встречается пепловый прослой, представленный белым алевритом. Образование этого слоя произошло, вероятно, в интервале от 250 л.н. (<sup>14</sup>C-дата 250 ± 45, АА-20942) до 800 л.н. (<sup>14</sup>C-дата 880 ± 40 л.н., ГИН-7344). Возраст подстилающих отложений (1360–1580 кал. л.н., Lu-9241) соответствует возрасту, определенному ранее [Разжигаяева, Ганзей, 2006]. Таким образом, формирование дюн Охотоморского побережья о. Итуруп соответствует началу третьей стадии прибрежного осадконакопления, периоду усиления процессов размыва [Афанасьев, 1992].

Несколько иначе обстоит дело на океанском побережье, где на пемзовой пирокластике (на отметке +7.5 м) наблюдается почвенно-тефровая толща мощностью около 2 м (рис. 3). Почвенный горизонт на контакте с пемзой имеет возраст 1530–1790 кал. л.н. (ЛУ-9221).

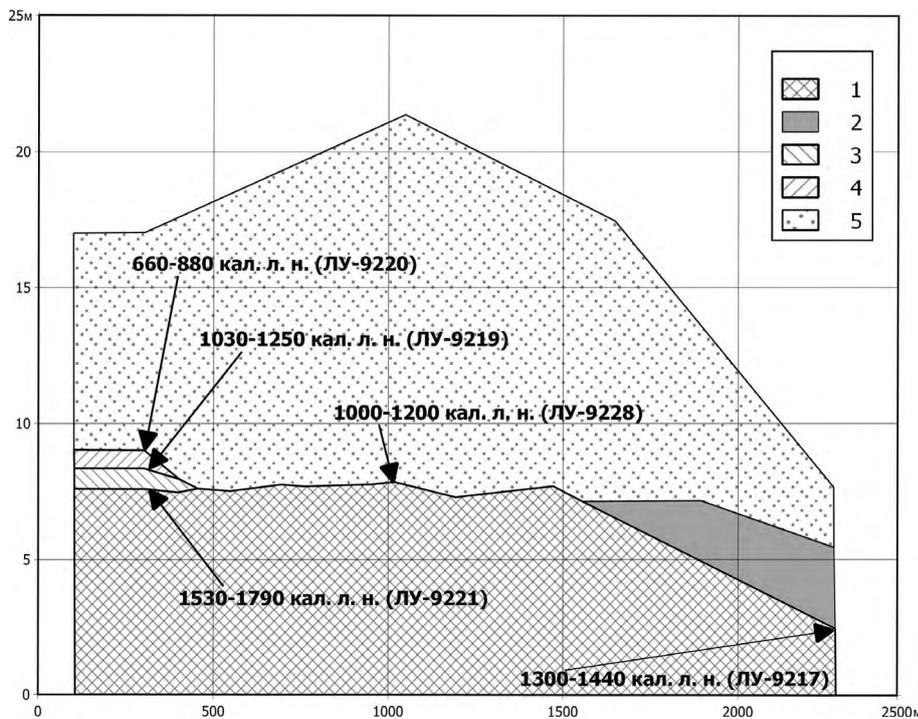


Рис. 1. Дюны Охотского побережья о. Итуруп (перешеек Ветровой).



**Рис. 2.** Поперечный профиль пемзового основания дюн морского берега с указанием местоположения датированных растительных остатков.

Однако в основании дюн высотой до 22 м лежит маломощный торфяник, формирование которого закончилось около 1000–1200 кал. л.н. (ЛУ-9228). Этому периоду соответствует и формирование прослая гумусированного пепла, перекрытого пеплами, на морском и океанском берегу – 898–1049 кал. л.н. (ЛУ-8685) и 1030–1250 кал. л.н. (ЛУ-9219) соответственно. Вскрытая мощность этих пеплов на морской стороне достигает 10 м, на океанском берегу не превышает 1.5 м. Следует отметить, что пеплы, вскрытые в морском береговом уступе, залегают на высоте 50–70 м.



**Рис. 3.** Береговой разрез океанского побережья о. Итуруп (перешеек Ветровой). 1 – пемзово-пирокластический цоколь, 2 – лагунные илы, 3 – почвенно-тефровые отложения, 4 – перевейанные пеплы, 5 – дюны (система высот балтийская БС-1977).

Таким образом, формирование более молодых дюн океанского побережья перешейка Ветровой, очевидно, связано с переработкой пирокластического материала, поступившего в береговую зону около 1000 лет назад. В то время как дюны с морской стороны формировались в результате разрушения высоких береговых уступов, сложенных пемзово-пирокластическим материалом в период усиления размыва при повышении уровня моря около 1.5 тыс. лет назад.

Над почвами, формирование которых закончилось 680–880 кал. л. н. (ЛУ-9220), залегают эоловые пески мощностью до 8 м. Второй цикл эолового морфолитогеоза здесь связан, вероятно, уже с перестройкой береговых морфолитосистем. Изменения интенсивности абразионно-аккумулятивных процессов сопровождались, в частности, прекращением лагунной седиментации с океанской стороны перешейка Ветровой, начавшейся 1300–1440 кал. л.н. (ЛУ-9217), и разрушением барьерной формы, ядро которой в виде абразионно-денудационных останцов плиоценовых вулканитов Камуйской свиты ( $N_2km$ ) прослеживается в 500 м от современного уреза.

Очевидно, что на вулканогенных берегах мы имеем дело с третьим типом эолового морфолитогеоза, связанным с перекомпенсированным осадконакоплением на некоторых участках береговой зоны в результате волновой переработки больших объемов легко разрушаемой пирокластики. Значительная доля пеплового материала в пирокластике обусловила и очень быстрое формирование толщи пелитовых отложений в бассейне лагунного типа с океанской стороны перешейка Ветровой.

Что касается эоловых образований более ранних эпох голоцена, то, учитывая существование в среднем голоцене на месте перешейка Ветровой пролива, их следует искать в центральной части перешейка. Наблюдаемые здесь гривы высотой до 50 м, ориентированные в юго-западном направлении, вероятно, и являются дюнными массивами, связанными с периодами высокого стояния уровня моря и интенсивным размывом высоких береговых уступов, сложенных пемзово-пирокластическим материалом [Afanas'ev et al., 2019].

Однако не следует исключать и вероятность волновой переработки пирокластике, попавшей в береговую зону непосредственно в период эксплозивных извержений среднего голоцена, на что указывают вулканотектонические дислокации в основании разреза высокого морского берегового уступа [Afanas'ev et al., 2019].

#### Список литературы

1. Афанасьев В.В. Эволюция побережья дальневосточных морей в голоцене // *Эволюция берегов в условиях поднятия уровня океана*. М.: ИО РАН, 1992. С. 166–174.
2. Бадюкова Е.Н., Соловьева Г.Д. Рельеф приморских дюн как индикатор колебаний уровня моря // *Вестник Москов. ун-та. Сер. 5, География*. 1997. № 5. С. 10–19.
3. Бадюкова Е.Н., Соловьева Г.Д. Прибрежные эоловые формы и колебания уровня моря // *Океанология*. 2015. Т. 55(1). С. 139–146. [Badyukova E.N., Solovieva G.D. Coastal eolian landforms and sea level fluctuations. *Oceanology*, 2015, 55(1): 124-130. <https://doi.org/10.1134/s0001437015010014>]
4. Ботвинкина Л.Н. *Генетические типы отложенный активного вулканизма*. М.: Наука, 1974. 318 с.
5. Игнатов Е.И. *Морфосистемный анализ берегов*. М.; Смоленск: Маджента, 2006. 328 с.
6. Короткий А.М. Эоловый рельеф Приморья и сопредельных территорий Восточной Азии (палеогеографический аспект) // *Геоморфология*. 2007. № 4. С. 79–95.
7. Короткий А.М., Разжигаета Н.Г., Мохова Л.М., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Базарова В.Б. Береговые дюны – индикатор глобальных похолоданий (о. Кунашир, Курильские острова) // *Тихоокеанская геология*. 1996. Т. 15(1). С. 53–59.
8. Мелекесцев И.В. Новейший наземный и подводный вулканизм Курильской островной дуги // *Новейший и современный вулканизм на территории России*. М.: Наука, 2005. С. 233–335.
9. Разжигаета Н.Г., Ганзей Л.А. *Обстановки осадконакопления островных территорий в плейстоцене–голоцене*. Владивосток: Дальнаука, 2006. 365 с.
10. Aagaard T., Orford J.D., Murray A.S. Environmental controls on coastal dune formation; Skallingen Spit, Denmark // *Geomorphology*. 2007. Vol. 83(1–2). P. 29–47. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.007>
11. Afanas'ev V.V., Uba A.V., Ignatov E.I., Dunaev N.N., Leontiev I.O., Gorbunov A.O. Vetrovoy isthmus of Iturup Island – Holocene strait // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2019. Vol. 324(1). P. 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012029>
12. Porter S.C. Late Pleistocene eolian sediments related to pyroclastic eruptions of Mauna Kea Volcano, Hawaii // *Quaternary Research*. 1997. Vol. 47(3). P. 261–276. <https://doi.org/10.1006/qres.1997.1892>
13. Provoost S., Jones M.L.M., Edmondson S.E. Changes in landscape and vegetation of coastal dunes in northwest Europe: a review // *J. of Coastal Conservation*. 2011. Vol. 15(1). P. 207–226. <https://doi.org/10.1007/s11852-009-0068-5>
14. Szkornik K., Gehrels W.R., Murray A.S. Aeolian sand movement and relative sea-level rise in Ho Bugt, western Denmark, during the 'Little Ice Age' // *The Holocene*. 2008. Vol. 18(6). P. 951–965. <https://doi.org/10.1177/0959683608091800>
15. Tamura T., Kodama Y., Bateman M.D., Saitoh Y., Yamaguchi N., Matsumoto D. Late Holocene aeolian sedimentation in the Tottori coastal dune field, Japan Sea, affected by the East Asian winter monsoon // *Quaternary International*. 2016. Vol. 397. P. 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.062>
16. Tanino K. Environments of the formation of dunes at Shiriyazaki in the Shimokita Peninsula, Aomori Prefecture // *The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu)*. 2000. Vol. 39(5). P. 471–478. <https://doi.org/10.4116/jaqua.39.471>
17. Vries, de, S., Southgate H.N., Kanning W., Ranasinghe R. Dune behavior and aeolian transport on decadal timescales // *Coastal Engineering*. 2012. Vol. 67. P. 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.04.002>
18. Vries, de, S., Arens S.M., De Schipper M.A., Ranasinghe R. Aeolian sediment transport on a beach with a varying sediment supply // *Aeolian Research*. 2014. Vol. 15. P. 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2014.08.001>

#### Об авторе

АФАНАСЬЕВ Виктор Викторович (ORCID 0000-0002-2344-1269), кандидат географических наук, заведующий лабораторией береговых геосистем, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.

## Паромайские термальные источники острова Сахалин: современное состояние и перспективы использования

© 2019 Р. В. Жарков\*<sup>1</sup>, Д. Н. Козлов<sup>1</sup>, В. В. Ершов<sup>1</sup>,  
Н. С. Сырбу<sup>2</sup>, О. А. Никитенко<sup>1</sup>, Г. В. Устюгов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток, Россия

\*E-mail: rafael\_zharkov@mail.ru

**Реферат.** Приводятся результаты современных исследований физико-химических свойств малоизвестных Паромайских термальных источников на севере о. Сахалин, полученные в ходе полевых работ в ноябре 2018 и октябре 2019 г. По сравнению с данными предшествующих исследований 1951 и 1953 гг. существенных изменений физико-химических свойств гидротерм не произошло. На небольшом участке в пойме р. Паромай находятся несколько термальных источников с температурой до 32 °С. По химическому составу воды Паромайских источников относятся к пресным (минерализация до 0.68 г/л), слабощелочным (рН 7.3–7.5), гидрокарбонатно-хлоридным натриевым. В термальных источниках наблюдаются интенсивные выходы газов, преимущественно состоящих из азота (61.4 %) и метана (31.6 %), что не свойственно другим проявлениям и месторождениям гидротерм северного Сахалина, в которых доминирует метан. Проведенные в районе термальных источников измерения объемной активности подпочвенного радона-222 не выявили аномальных концентраций, значения ОА Rn 58–83 Бк/м<sup>3</sup> сопоставимы со значениями для других проявлений и месторождений термальных и минеральных вод острова. Рассчитанные с помощью комплекса геотермометров (Na–K, K–Mg, Na–Li, Mg–Li, SiO<sub>2</sub>) температуры глубинного водного резервуара составляют 30–40 °С, что соответствует глубине формирования исследуемых гидротерм в 1–1.5 км. Паромайские термальные воды можно использовать как питьевые столовые воды и для наружного бальнеологического применения.

**Ключевые слова:** термальные воды, Паромай, геохимические особенности, остров Сахалин.

Для цитирования: Жарков Р.В., Козлов Д.Н., Ершов В.В., Сырбу Н.С., Никитенко О.А., Устюгов Г.В. Паромайские термальные источники острова Сахалин: современное состояние и перспективы использования. *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 4. С. 428–437. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.428-437>

## Paromay thermal springs of Sakhalin Island: modern state and prospects for use

Rafael V. Zharkov\*<sup>1</sup>, Dmitry N. Kozlov<sup>1</sup>, Valeryi V. Ershov<sup>1</sup>,  
Nadezhda S. Syrbu<sup>2</sup>, Olga A. Nikitenko<sup>1</sup>, Gennadyi V. Ustyugov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>2</sup>V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

\*E-mail: rafael\_zharkov@mail.ru

**Abstract.** The paper presents the results of modern studies of physical and chemical features of little-known Paromay thermal springs in the north of Sakhalin Island, obtained during field works in November 2018 and October 2019. There were no significant changes in the thermal spring physical and chemical features in comparison with the previous studies of 1951 and 1953. Several thermal springs with a temperature up to 32 °C are on a small plot in the floodplain of the Paromay River. By chemical composition Paromay springs belong to fresh (mineralization up to 0.68 g/l), slightly alkaline (pH 7.3–7.5), hydrogen carbonate-chloride sodium waters. Gas composition of thermal springs mainly consists of nitrogen (61.4 %) and methane (31.6 %), which are not typical to other thermal springs of North Sakhalin, in which the methane dominates. The measurements of volumetric activity of subsoil radon-222 in the area of thermal springs do not reveal abnormal concentrations; values of OA Rn 58–83 Bq/m<sup>3</sup> are comparable to other manifestations of thermal

and mineral waters of the island. Computed by complex geothermal meters (Na–K, K–Mg, Na–Li, Mg–Li, SiO<sub>2</sub>) the temperatures of deep water reservoir are 30–40 °C, which corresponds to thermal spring formation depth of 1–1.5 km. Paromay thermal waters can be used as drinking water and for balneological application.

**Keywords:** thermal waters, Paromay, geochemical features, Sakhalin Island.

*For citation:* Zharkov R.V., Kozlov D.N., Ershov V.V., Syrбу N.S., Nikitenko O.A., Ustyugov G.V. Paromay thermal springs of Sakhalin Island: modern state and prospects for use. *Geosystems of Transition Zones*, 2019, vol. 3, no. 4, pp. 428–437. (In Russian) <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.428-437>

## Введение

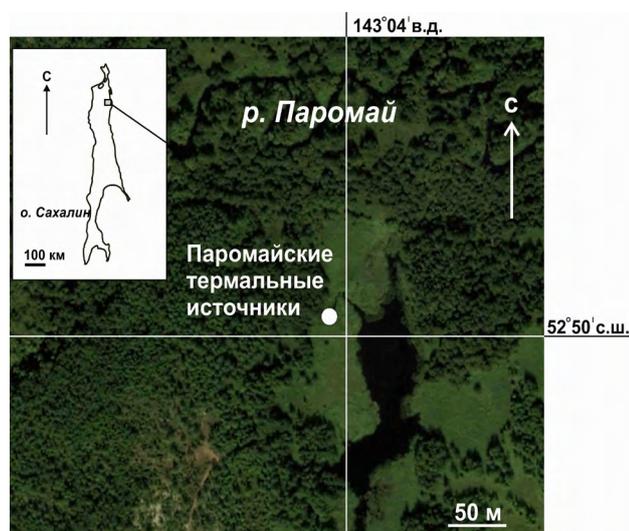
Паромайские термальные источники находятся на правом берегу р. Паромай у северо-западной оконечности безымянного пресного озера размерами 220 × 60 м (рис. 1), в 1 км западнее пересечения с рекой трассы г. Южно-Сахалинск – г. Оха. В орографическом отношении район лежит в пределах Северо-Сахалинской равнины, осложненной отдельными поднятиями высотой около 100 м. Источники выходят в области развития песчаников нутовской свиты, на восточном крыле Паромайской антиклинали, в 3–4 км к востоку от ее оси. Породы нутовской свиты, представленные в данном районе песками, имеют в естественных обнажениях светло-желтоватую и светло-коричневую окраску [Иванов, 1954]. Выходы гидротерм приурочены, очевидно, к тектоническим нарушениям меридионального направления, так как расположены в зоне активного Гаромайского разлома. По данным [Ломтев, Патрикеев, 2017], последнее сейсмическое событие

в пределах Гаромайского разлома произошло не так давно – первые сотни лет назад.

Паромайские термальные источники до 1945 г. использовались японцами для купания, сведений о проводимых ими исследованиях не сохранилось. В 1950–1960 гг. отечественными учеными [Левченко, Макарова, 1953; Иванов, 1954; Цитенко, Евстафьева, 1962] даны описания и физико-химическая характеристика вод и газовых выходов источников. С начала 1960-х гг. до настоящего времени в фондовых материалах и научной литературе, посвященной термальным и минеральным водам Сахалина [Современная изученность... , 1991; Челнокова и др., 2010; Челнокова, Гвозденко, 2017; Chelnokov et al., 2015, 2018], сведений о современном состоянии Паромайских термальных источников нет.

Первые полевые обследования этих термальных источников авторами проводились в ноябре 2018 г. (Жарков Р.В., Козлов Д.Н., Климанцов И.М.) и в октябре 2019 г. (Жарков Р.В., Андриянов Д.А.). Основной целью исследований было выявление современных физико-химических особенностей гидротерм и оценка перспектив их использования в бальнеотерапии. Для выполнения поставленной цели был проведен химический анализ воды и определен состав выделяющихся со дна газов для нескольких наиболее представительных термальных источников. Также проводились измерения объемной активности почвенного радона-222 в районе источников.

Исследования показали, что Паромайские источники схожи по физико-химическим характеристикам с Агневскими термальными источниками [Жарков, Козлов, 2017] в северной части Сахалина и с Амурскими [Жарков



**Рис. 1.** Схема расположения Паромайских термальных источников (космический снимок Google Earth от 04.09.2018 г.).

и др., 2018] на юге острова. Известные и детально изученные Дагинские термальные источники [Жарков, 2018; Павлова, Жарков, 2018], расположенные в 88 км к югу от Паромайских, существенно отличаются от них как по температуре и дебиту, так и по химическому и газовому составу.

### Методы исследований

В ходе полевых исследований проводились отбор проб термальных вод и газов источников и определения основных физико-химических параметров термальных вод (рН, температура). Объемную активность радона-222 (ОА Rn) в почвенном воздухе измеряли с помощью сейсмической радоновой станции СРС-05 (приборостроительная компания ООО «НТМ-Защита», г. Москва). Анализ химического состава водных проб выполнен в Центре коллективного пользования ИМГиГ ДВО РАН. Водные пробы предварительно очищали с помощью мембранных фильтров (0.45 мкм). Содержание  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  определяли методом ионной хроматографии на высокоэффективном жидкостном хроматографе LC-20 Prominence с кондуктометрической ячейкой (Shimadzu, Япония); содержание неорганического углерода (IC – inorganic carbon) и общего азота (TN – total nitrogen) – на анализаторе углерода TOC-L CSN с приставкой TNM-L для определения общего азота (Shimadzu, Япония). Концентрацию  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$  измеряли титриметрическим методом с визуальной индикацией конечной точки титрования. Для определения водородного показателя использовался портативный рН-метр WTW 3110 ProfiLine. Анализы газов выполнены на газовом хроматографе «Кристаллюкс 4000М» с детекторами ионизации в пламени и теплопроводности и портативном газовом хроматографе «Газохром-2000». Методики газогеохимических исследований закреплены в Паспорте лаборатории газогеохимии ПС 1.047-18, утвержденном Свидетельством Росстандарта № 41 от 17.09.2018 (лаборатория газогеохимии ТОИ ДВО РАН, г. Владивосток).

С помощью гидрохимических геотермометров ( $\text{Na-K}$ ,  $\text{K-Mg}$ ,  $\text{Na-Li}$ ,  $\text{Mg-Li}$ ,  $\text{SiO}_2$ ) (см.: [Giggenbach, 1988; Kharaka, Mariner, 1989]) проведены оценки температуры формирования Паромайских гидротерм.

### Результаты и обсуждение исследований Физико-химические свойства Паромайских термальных источников в 1951–2019 гг.

Первое детальное описание Паромайских термальных источников дано в отчете В.М. Левченко и К.А. Макаровой [1953], посетивших это термопроявление 6 октября 1951 г. По описаниям исследователей, многочисленные малодебитные холодные и термальные источники расположены в русле и на берегу небольшого холодного ручейка, стекающего в ложбине озерной террасы. На правой стороне ручейка находится небольшая дощатая ванна глубиной около 1 м и размерами 110 × 136 см. На дне ванны также имеются выходы теплой воды и выделяются мелкие пузырьки газа. Температура воды в ванне была 31 °С, в некоторых источниках около ванны температура достигала 32 °С при температуре воздуха 18.5 °С. Дебит всех вытекающих источников невелик и оценен приблизительно в 1 л/с. При этом дебит гидротерм в ванне составлял около 0.2 л/с. Никаких признаков сероводорода, никакого цвета, запаха и вкуса термальная вода не имела. В 1951 г. в Сахалинском филиале АН СССР (ныне ИМГиГ ДВО РАН) из пробы воды, взятой Левченко, был выполнен краткий химический анализ (табл. 1), на основании которого гидротермы можно отнести к пресному (минерализация 0.7 г/л) слабощелочному (рН 7.5) гидрокарбонатно-хлоридному натриевому типу.

В 1953 г. [Иванов, 1954] подробно описаны источники, выполнен химический анализ воды, анализ растворенного и спонтанного газа. По описаниям В.В. Иванова, в центре участка, на котором выходит вода, расположен колодец глубиной 0.6 м и сечением 110 × 135 см, закрепленный деревянным срубом (рис. 2). В отчете [Иванов, 1954] этот колодец обозначен как Главный



**Рис. 2.** Вид с запада на группу Паромайских термальных источников и Главный термальный источник в 1953 г. [Иванов, 1954].

(Основной) термальный источник. Дно колодца дощатое, в значительной части разрушенное. Через сруб колодца из толщи песчано-глинистых отложений поступает незначительная часть воды, большая же ее часть выходит в виде многочисленных мелких источников в радиусе 5–10 м вокруг колодца.

Температура воды в колодце у дна составляла 32.3–32.4 °С, температура воды в источниках вокруг колодца – в пределах 20–32.4 °С. Дебит колодца 0.1 л/с, общий дебит источников Паромайской группы около 1.3 л/с. На основании данных химического состава воды гидротермы можно отнести к пресным (минерализация 0.6 г/л), щелочным (рН 8.4), гидрокарбонатно-хлоридным натриевым. Содержание кремнекислоты ( $H_2SiO_3$ ) в воде очень мало – 23.4 мг/л. Какие-либо другие бальнеологические компоненты в воде Паромайских источников не обнаружены.

По мнению В.В. Иванова [1954], весьма низкая минерализация и значительное содержание азота (что резко отличает воду Паромайских источников от глубоко залегающих вод) позволяют считать, что в ее составе значительную роль играют инфильтрационные атмосферные воды. Относительно низкая температура воды, отсутствие специфических бальнеологических компонентов и малопривлекательные ландшафтные условия делают нецелесообразной организацию практического лечебного использования Паромайских термальных источников.

Проведенные летом 1960 г. исследования [Цитенко, Евстафьева, 1962] подтвердили основные физико-химические характеристики термальных вод Паромайских источников (табл. 1).

Обследование Паромайских термальных источников, проведенное авторами в ноябре 2018 и октябре 2019 г., выявило небольшие изменения, по сравнению с описаниями начала 1950-х годов, внешнего облика Главного источника. В настоящее время он разрыт и вытянут в северном направлении (рис. 3), несколькими досками каптирована его южная и северная части (рис. 4). Глубина Главного источника 30–60 см, общая длина около 4 м при ширине 60–150 см. В западной части в источник впадает небольшой холодный ручеек, поэтому температура воды в источнике составляет 20–31 °С, а в северной части у дна достигает 31.4 °С. Местами



**Рис. 3.** Вид с юга на Паромайские термальные источники. Ноябрь 2018 г. Фото Д.Н. Козлова

Таблица 1. Химический состав Паромайских термальных источников (в мг/л)

Показатель	1	2	3	4	5	6
T, °C	31.5	32.4	32.0	30.9	17	27
pH	7.5	8.4	7.5	7.4	7.3	7.5
Na <sup>+</sup>	189	159	184	154	146	179
K <sup>+</sup>		0.9		1.0	1.4	1.2
Ca <sup>2+</sup>	4.7	4.4	6.0	4.5	5.8	5.3
Mg <sup>2+</sup>	1.1	2.2	1.0	1.1	1.6	1.5
NH <sub>4</sub>	–	0.7	–	0.12	0.23	0.23
Cl <sup>-</sup>	64	40	39.0	29	33	41
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2.1	2.9	4.0	< 0.05	0.2	< 0.05
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	–	–	–	0.4	0.5	0.6
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	408	378	439	410	385	450
TDS	700	643	673	600	574	679
Br <sup>-</sup>	–	0.1	–	0.10	0.10	0.12
F <sup>-</sup>	–	–	–	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Li <sup>+</sup>	–	–	–	0.005	0.006	0.008
B	–	–	–	0.46	0.44	0.55
Si	–	–	–	10.7	10.6	10.9
IC	–	–	–	84	80	92
TN	–	–	–	0.6	0.7	0.8

Примечания. Прочерк – элемент в пробе не определялся; TN – total nitrogen, IC – inorganic carbon. Пробы воды: 1–4 – Главный источник, дата отбора 06.10.1951 [Левченко, Макарова, 1953] (1), 16.08.1953 [Иванов, 1954] (2), 17.07.1960 [Цитенко, Евстафьева, 1962] (3), 05.11.2018 (4); 5 – источник, расположенный южнее Главного источника, 05.11.2018; 6 – источник с запада от Главного источника, 05.11.2018.

со дна поднимаются пузырьки газов, наиболее интенсивные выходы отмечаются в северной части источника и в русле вытекающего из него теплого ручейка, впадающего в северо-западную часть озера. По химическо-

му составу гидротермы Главного источника отнесены, как и ранее, к пресным, слабощелочным, гидрокарбонатно-хлоридным натриевым (табл. 1). Вокруг Главного источника можно отметить несколько малодобитных



Рис. 4. Южная часть (слева) и северная часть Главного термального источника с выходами со дна газов. Ноябрь 2018 г. Фото Р.В. Жаркова

источников, схожих по химическому составу. В нескольких метрах южнее Главного источника, на склоне небольшой песчаной террасы, расположен выход воды с температурой 16–17 °С. В западной части находятся источники с температурой 20–30.5 °С, в гидротермальных выходах развиты синезеленые термофильные водоросли и ряска, периодически выделяются газы.

Эти малодобитные источники также имеют гидрокарбонатно-хлоридный натриевый состав, низкую минерализацию и pH 7.5.

Несмотря на разные температуру и условия выхода на поверхность, термальные воды трех опробованных в 2018 г. источников имеют практически одинаковый химический состав, низкую общую минерализацию (0.57–0.68 г/л) и pH 7.3–7.5. Среди макрокомпонентов в гидротермах преобладают натрий (146–179 мг/л), гидрокарбонат-ион (385–450 мг/л) и хлор (29–41 мг/л). Значения концентраций  $\text{NO}_3^-$  и TN свидетельствуют о низком содержании азотсодержащих соединений в исследуемых водах. Азот – это биогенный элемент, образующийся при разложении органики. Азот является хорошим маркером антропогенного загрязнения – промышленного, сельскохозяйственного, коммунально-бытового и др. В данном случае о подобном загрязнении говорить не приходится: соединения азота в исследуемые воды попадают, вероятно, естественным путем в ходе своего биогеохимического цикла. Известно, что фтор в больших количествах обладает токсичными свойствами, повышая риск возникновения различных заболеваний – флюороза, патологий костно-мышечной системы, нарушений функций щитовидной железы и др. Его предельно допустимая концентрация, например, в пи-

тчевых водах составляет 1.5 мг/л. Видно, что в нашем случае концентрации F очень низкие (<0.1 мг/л) и не представляют опасности для здоровья. Бор, бром и кремний относятся к биологически активным компонентам минеральных вод. В паромайских водах концентрации Br (0.10–0.12 мг/л), В (0.44–0.55 мг/л) и Si (10.6–10.9 мг/л) существенно ниже бальнеологической нормы [ГОСТ Р 54316–2011]: бром не менее 25 мг/л; бор (в пересчете на ортоборную кислоту) не менее 35 мг/л; кремний (в пересчете на метакремниевую кислоту) не менее 50 мг/л. Одним из главных источников поступления лития в подземные воды осадочных бассейнов является его десорбция из глин при достаточно большом времени взаимодействия вода–порода и относительно высоких температурах. Низкие концентрации  $\text{Li}^+$ , полученные в нашем случае, позволяют говорить о том, что исследуемые воды формируются в зоне свободного водообмена на довольно небольших глубинах. Заметим также, что отношение Cl/Br имеет значения в диапазоне 290–400, что указывает на возможную подпитку Паромайских источников морскими водами.

Общие физико-химические параметры Паромайских гидротерм за более чем 65-летний период их исследований имеют стабильный характер. Диапазон изменения во времени концентраций макроэлементов незначительный.

### Состав газов

#### Паромайских термальных источников

Анализы растворенного и спонтанного газов Главного источника в 1953 г. [Иванов, 1954] показали преобладание азота и метана (табл. 2). В свободном газе доминирует азот

Таблица 2. Состав свободно выделяющихся газов в Главном Паромайском термальном источнике (в %)

№	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> +Ar	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	He, ppm	H <sub>2</sub> , ppm
1	0.65	0.00	~66.00	~33.00	–	–	–	0.0
2	0.00	0.00	48.30	51.69	–	–	–	0.0
3	0.11	0.44	61.45	31.63	0.02	0.00004	30.0	1.6

Примечания. Прочерк – элемент в пробе не определялся. 1 – свободный газ, дата отбора 17.08.1953 [Иванов, 1954]; 2 – растворенный газ, 18.08.1953 [Иванов, 1954]; 3 – свободный газ, 05.11.2018.

(~66 %), в растворенном газе немного преобладает метан (~52 %).

Отмечено [Иванов, 1954], что нефтяные воды Паромайского нефтяного месторождения, а также других нефтяных и гидротермальных месторождений на севере Сахалина являются метановыми. Химический состав воды и преобладание азота в составе свободно выделяющихся газов термальных источников может указывать на значительную роль инфильтрационных атмосферных вод в питании данных гидротерм.

В 2018 г. в газовом составе поднимающихся в северной части со дна пузырьков (табл. 2) преобладали азот (61 %) и метан (~32 %). Газовый состав не претерпел существенных изменений за последние 65 лет, содержания азота и метаны стабильны. Концентрации гелия (30 ppm) и водорода (1.6 ppm) в свободном газе Паромайских гидротерм типичны для термальных и минеральных месторождений о. Сахалин [Шакиров и др., 2016].

#### **Содержание подпочвенного радона в районе Паромайских термальных источников**

5 ноября 2018 г. в шурфе на песчаной террасе в 10 м юго-западнее Главного источника было проведено 5 последовательных измерений объемной активности радона-222 (ОА Rn) в воздухе подпочвы. Исследования потока радона ведутся как с целью выявления зон разуплотнения, выступающих в качестве проводящих коллекторов для подпочвенных газов и указывающих на наличие систем региональных разломов, так и с целью поиска предвестников землетрясений [Зубков, 1981; Cicerone et al., 2009; Chelnokov et al., 2015; Фирстов, Макаров, 2018; Макаров и др., 2018; Фирстов и др., 2018]. Для гидротермальных и минеральных проявлений и месторождений Сахалина характерен низкий уровень концентрации радона в подпочвенном воздухе. По данным [Челноков и др., 2015; Chelnokov et al., 2015], на Синегорском месторождении минеральных вод ОА Rn составляет 64 Бк/м<sup>3</sup>, на Волчанских минеральных источниках достигает 51 Бк/м<sup>3</sup>, на территории Лесогор-

ских термальных источников – 100 Бк/м<sup>3</sup>. По нашим впервые полученным данным, содержание подпочвенного радона в районе Главного Паромайского источника составляет 58–83 Бк/м<sup>3</sup>, что сопоставимо со значениями в перечисленных проявлениях и месторождениях.

#### **Геотермические условия формирования гидротерм**

С помощью гидрохимических геотермометров (Na–K, K–Mg, Na–Li, Mg–Li, SiO<sub>2</sub>) проведены оценки температуры формирования вод Паромайских гидротерм. Гидрохимические геотермометры – это полуэмпирические зависимости, которые связывают концентрации некоторых компонентов химического состава (Na, K, Mg, Li, SiO<sub>2</sub>) и температуру подземных вод. Применение того или иного геотермометра имеет свою специфику и зависит от состава водовмещающих пород. Поэтому результаты расчетов по различным гидрохимическим геотермометрам могут различаться. Для вод гидротермальных систем наиболее подходящими считаются Na–K и K–Mg геотермометры [Giggenbach, 1988].

Пластовые температуры Паромайских источников, рассчитанные по K–Mg геотермометру, составляют от 41 до 44 °С, по Na–K геотермометру – от 80 до 96 °С (табл. 3). При этом установлено, что концентрации Na и K в термальных водах достигают равновесного состояния медленнее, чем концентрации K и Mg, поэтому температуры, рассчитанные по K–Mg геотермометру, следует считать более надежными [Giggenbach, 1988]. Необходимо также учитывать, что Na–K геотермометры откалиброваны и используются обычно для термальных вод с высокими пластовыми температурами – 100–150 °С и выше [Kharaka, Mariner, 1989].

Кремниевые геотермометры основаны на растворимости кварца, халцедона, кристобалита или аморфного диоксида кремния. При использовании этих геотермометров может возникнуть неопределенность в отношении того, какой именно минерал контролирует концентрацию растворенного кремнезема.

В работе [Kharaka, Mariner, 1989] отмечается, что при температурах ниже примерно 110 °С растворенный кремнезем будет контролироваться халцедоном. Оценки пластовых температур Паромайских источников, рассчитанные с помощью SiO<sub>2</sub> геотермометра (по халцедону), составляют 36–37 °С (табл. 3).

В области низких пластовых температур (меньше 70 °С) рекомендуется также использовать Na–Li и Mg–Li геотермометры [Kharaka, Mariner, 1989]. Оценки температур, полученные нами по Na–Li геотермометру, составляют 29–37 °С (табл. 3). Это хорошо согласуется с температурными оценками по K–Mg и SiO<sub>2</sub> геотермометрам. Mg–Li геотермометр показывает пластовые температуры 9–14 °С (табл. 3). Здесь необходимо отметить, что концентрации Li в Паромайских термальных водах очень низкие – менее 10 мкг/л. Такие концентрации определяются на нижнем пределе обнаружения ионного хроматографа. В связи с этим относительная погрешность определяемой концентрации Li может повышаться до 30–50 %.

Таблица 3. Оценки температур формирования вод Паромайских термальных источников по гидрохимическим геотермометрам

Геотермометр	Температура (°С)		
	4	5	6
K–Mg	41	44	41
Na–K	80	96	81
SiO <sub>2</sub> (по халцедону)	37	36	37
Na–Li	29	35	37
Mg–Li	9	9	14

Примечания. 4 – Главный источник, 5 – источник, расположенный южнее Главного источника, 6 – источник с запада от Главного. Номера источников совпадают с номерами в табл. 1.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что значения температуры формирования Паромайских термальных вод, рассчитанные по комплексу геотермометров, находятся в диапазоне 30–40 °С. Принимая среднюю для севера Сахалина геотермическую ступень 33.2 м на 1 °С [Штейн, 1962], можно определить примерную глубину формирования для Паромайских гидротерм – 1–1.5 км.

### Возможности применения гидротерм в бальнеотерапии

Паромайские термальные источники малоизвестны среди жителей и гостей острова, они редко посещаются и используются. Физико-химические свойства гидротерм предполагают возможность их использования в качестве питьевых столовых вод и для наружного применения в бальнеотерапии. Согласно [ГОСТ Р 54316–2011], Паромайские термальные воды можно отнести к Ессентукскому горному гидрохимическому типу питьевых столовых вод I гидрокарбонатной натриевой группы, у которого нет медицинских показаний для внутреннего применения. Для наружного (бальнеологического) применения Паромайских гидротерм аналогом условно может быть Горячинский тип кремнистых термальных вод [Классификация минеральных... , 2000]. Воды этого типа рекомендуется использовать в виде ванн при болезнях системы кровообращения, болезнях нервной системы, болезнях эндокринной системы, расстройстве питания и нарушении обмена веществ (ожирение алиментарное), при болезнях мочеполовой системы, болезнях кожи. Вследствие низкой общей минерализации Паромайских гидротерм, незначительных концентраций биологически активных компонентов (в том числе кремния) и невысокой температуры, бальнеологический эффект от внутреннего и наружного применения предполагается незначительный. Для детальной оценки перспектив внутреннего и наружного использования вод в дальнейшем необходимы комплексные физико-химические и экспериментально-клинические исследования.

### Заключение

На сегодняшний день Паромайские термальные источники на севере Сахалина малоизвестны и практически не используются, в отличие, например, от Дагинских термальных источников. Современные исследования Паромайских источников в ходе полевых работ в ноябре 2018 и октябре 2019 г. не выявили существенных изменений физико-

химических свойств гидротерм по сравнению с данными 1950–1960 гг.

Источники с температурой до 32 °С относятся к пресным, слабощелочным (рН около 7.5), гидрокарбонатно-хлоридным натриевым водам.

В составе свободно выделяющихся газов преобладают азот (61.4 %) и метан (31.6 %), что резко отличает их от других проявлений и месторождений гидротерм северного Сахалина, в которых доминирует метан.

Проведенные в районе термальных источников измерения объемной активности подпочвенного радона-222 показали относительно низкие концентрации (58–83 Бк/м<sup>3</sup>), что свойственно и другим проявлениям и месторождениям термальных и минеральных вод Сахалина.

Глубину формирования исследуемых гидротерм можно оценить в 1–1.5 км, что соответствует температуре глубинного водного резервуара (30–40 °С), рассчитанной с помощью комплекса геотермометров.

Использовать воды Паромайских источников можно в качестве питьевых столовых, не имеющих медицинских показаний к применению. Возможно наружное бальнеологическое применение гидротерм по аналогии с кремнистыми водами, но из-за низких температур и концентраций элементов, в том числе кремния, бальнеотерапевтический эффект может быть незначителен. Окончательный вывод можно сделать после комплексных физико-химических и экспериментально-клинических исследований. Полагаем, что Паромайские термальные источники и окружающие их ландшафты больше подходят для рекреации и экологического туризма, чем для лечебно-оздоровительных процедур.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН и гранта РФФИ (грант № 20-35-70014).*

#### Список литературы

1. ГОСТ Р 54316–2011. *Воды минеральные природные питьевые. Общие технические условия*. М.: Стандартинформ, 2011. 48 с.
2. Жарков Р.В. Современные физико-химические особенности термоминеральных вод Дагинского месторождения (о. Сахалин) // *Мониторинг. Наука и технологии*. 2018. № 4(37). С. 6–11.

3. Жарков Р.В., Козлов Д.Н. Современные сведения о состоянии Агневских термальных источников (остров Сахалин) // *Вестник ДВО РАН*. 2017. № 1. С. 5–11.

4. Жарков Р.В., Козлов Д.Н., Веселов О.В., Еришов В.В., Сырбу Н.С., Никитенко О.А. Амурские термальные источники (остров Сахалин) // *Успехи современного естествознания*. 2018. № 11 (ч. 2). С. 317–322. <https://doi.org/10.17513/use.36946>

5. Зубков С.И. Радонные предвестники землетрясений // *Вулканология и сейсмология*. 1981. № 6. С. 74–105.

6. Иванов В.В. *Курортные ресурсы Сахалина и перспективы их лечебного использования: отчет комплексного отряда Сахалинской экспедиции*. М.: Центральный ин-т курортологии, 1954. 265 с.

7. *Классификация минеральных вод и лечебных грязей для целей их сертификации: Методические указания № 2000/34* / А.Н. Разумов, В.Б. Адилев, О.Б. Давыдова и др. М.: РНЦ ВМиК, 2000. 150 с.

8. Левченко В.М., Макарова К.А. *Минеральные источники и лечебные грязи Сахалина*. Ново-Александровск: СФ АН СССР. 1953. 84 с. Инв. № 550-ф (фонды ИМГиГ ДВО РАН).

9. Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н. Сейсмические признаки активных разломов Северного Сахалина = Lomtev V.L., Patrickeyev V.N. Seismic signatures indicators of North Sakhalin active faults // *Геосистемы переходных зон*. 2017. Т. 1, № 1. С. 37–48. doi:10.30730/2541-8912.2017.1.1.037-048

10. Макаров Е.О., Фирстов П.П., Костылев Д.В., Рылов Е.С., Дудченко И.П. Первые результаты мониторинга подпочвенного радона сетью пунктов, работающей в тестовом режиме, на юге острова Сахалин // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2018. № 5(25). С. 89–104. doi:10.18454/2079-6641-2018-25-5-89-104

11. Павлова В.Ю., Жарков Р.В. Результаты георадарных исследований на территории Дагинской гидротермальной системы (остров Сахалин) = Pavlova V.Yu., Zharkov R.V. GPR surveys of the discharge zone of the Daginsky hydrothermal system (Sakhalin Island) // *Геосистемы переходных зон*. 2018. Т. 2, № 4. С. 323–331. doi:10.30730/2541-8912.2018.2.4.323-331

12. *Современная изученность гидротермоминеральных ресурсов Сахалина и Курильских островов и перспективы их использования в народном хозяйстве*: геол. отчет за 1990–1991 гг. / исполн.: Т.С. Розорителева, В.Е. Прядко, Е.Л. Спалило. Южно-Сахалинск: Сахалингеология. 1991. 895 с. Инв. № 461852 (Росгеолфонд, Центральное фондохранилище).

13. Фирстов П.П., Макаров Е.О. *Динамика подпочвенного радона на Камчатке*. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2018. 145 с.

14. Фирстов П.П., Макаров Е.О., Глухова И.П., Будилов Д.И., Исакевич Д.В. Поиск предвестниковых аномалий сильных землетрясений по данным мониторинга подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне = Firstov P.P.,

- Makarov E.O., Glukhova I.P., Budilov D.I., Isakevich D.V. Search for predictive anomalies of strong earthquakes according to monitoring of subsoil gases at Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic test site // *Геосистемы переходных зон*. 2018. Т. 2, № 1. С. 16–32. doi:10.30730/2541-8912.2018.2.1.016-032
15. Цитенко Н.Д., Евстафьева В.И. *Гидрогеологические факторы формирования и разрушения нефтяных и газовых залежей Сахалина*: геол. отчет. Оха: ВНИГРИ, 1962. 307 с. Инв. № 1482-ф (фонды ИМГиГ ДВО РАН).
16. Челноков Г.А., Жарков Р.В., Брагин И.В., Веселов О.В., Харитоновна Н.А., Шакиров Р.Б. Геохимические характеристики подземных флюидов южной части Центрально-Сахалинского разлома // *Тихоокеанская геология*. 2015. Т. 35, № 5. С. 81–95.
17. Челнокова Б.И., Гвозденко Т.А. *Минеральные воды и лечебные грязи Дальнего Востока: справочник*. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2017. 220 с.
18. Челнокова Б.И., Иванов Е.М., Гвозденко Т.А. *Минеральные воды и лечебные грязи Дальнего Востока: справочник*. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2010. 128 с.
19. Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Обжиров А.И. Распределение гелия и водорода в отложениях и воде на склоне о. Сахалин // *Литология и полезные ископаемые*. 2016. № 1. С. 68–81. [Shakirov R.B., Syrbu N.S., Obzhirov A.I. Distribution of helium and hydrogen in sediments and water on the Sakhalin slope. *Lithology and Mineral Resources*. 2016, 51(1): 61-73. https://doi.org/10.1134/s0024490216010065]
20. Штейн М.А. Определение параметров и глубин залегания термальных подземных вод // *Труды СахКНИИ*. Южно-Сахалинск: СахКНИИ, 1962. Вып. 12. С. 162–165.
21. Chelnokov G., Zharkov R., Bragin I. Radon monitoring in groundwater and soil gas of Sakhalin Island // *J. of Geoscience and Environment Protection*. 2015. Vol. 3. P. 48–53. http://dx.doi.org/10.4236/gep.2015.35006
22. Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A. Geochemistry of mineral waters and associated gases of the Sakhalin Island (Far East of Russia) // *J. of Hydrology*. 2018. Vol. 559. P. 942–953. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.049
23. Cicerone R.D., Ebel J.E., Beitton J.A. Systematic compilation of earthquake precursors // *Tectonophysics*. 2009. № 476. P. 371–396. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.008
24. Giggenbach W.F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na–K–Mg–Ca geothermometers // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1988. Vol. 52(12). P. 2749–2765. https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3.
25. Kharaka Y.K., Mariner R.H. Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins // *Thermal History of Sedimentary Basins, Methods and Case Histories*. New York, 1989. P. 99–117. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3492-0\_6

#### Об авторах

ЖАРКОВ Рафаэль Владимирович (ORCID 0000-0002-9753-0627), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, КОЗЛОВ Дмитрий Николаевич (ORCID 0000-0002-8640-086X), кандидат географических наук, старший научный сотрудник – лаборатория вулканологии и вулканопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск; ЕРШОВ Валерий Валерьевич (ORCID 0000-0003-2289-6103), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, НИКИТЕНКО Ольга Александровна (ORCID 0000-0002-0177-2147), научный сотрудник, УСТЮГОВ Геннадий Викторович, инженер-исследователь – отдел исследования вещественного состава геосфер Центра коллективного пользования, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск; СЫРБУ Надежда Сергеевна (ORCID 0000-0002-1441-6133), кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории газогеохимии, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток

## Физические и химические особенности сапропелевых грязей некоторых пресноводных озер Елизовского района Камчатского края (Россия)

© 2019 Р. В. Жарков\*<sup>1</sup>, Д. Н. Козлов<sup>1</sup>, Б. И. Челнокова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup>Владивостокский филиал ДНЦ ФПД – НИИМКВЛ, Владивосток, Россия

\*E-mail: rafael\_zharkov@mail.ru

**Реферат.** Впервые приводятся данные о физико-химических свойствах сапропелевых грязей и морфологии дна нескольких пресных озер центральной части Елизовского района Камчатского края. В 2016 г. исследовались озера Овальное и Синичкино (район г. Петропавловск-Камчатский), озеро Лесное (район с. Паратунка) и безымянное озеро в 2.5 км южнее с. Малки. Цель исследований заключалась в изучении особенностей физико-химических свойств сапропелей и оценке перспектив бальнеотерапевтического и косметологического использования. Среди обследованных озер наиболее перспективными оказались сапропелевые грязи безымянного озера в районе с. Малки. Физические показатели их соответствуют основным нормам для лечебных сапропелевых грязей: влажность 71.28–95.27 %, объемный вес 1.13–1.14 г/см<sup>3</sup>, величина сопротивления сдвигу 1128–1619 дин/см<sup>2</sup>, теплоемкость 0.95–0.98 кал/г·град, липкость при 25 °С 2556–3714 дин/см<sup>2</sup>. Состав грязевого раствора характеризуется как сульфатно-гидрокарбонатный магниевно-натриево-кальциевый. Содержание биологически активных элементов невысокое (I – 0.05 мг/дм<sup>3</sup>; Br – 0.085 мг/дм<sup>3</sup>; B < 0.05 мг/дм<sup>3</sup>; H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> – 40.6 мг/дм<sup>3</sup>). По сумме минеральных веществ (M – 0.059 г/дм<sup>3</sup>) грязевой раствор относится к пресному, рН грязи 5.2–7.2, Eh достигает –100 mV. Натуральные грязи безымянного озера в районе с. Малки относятся к лечебным пресноводным бессульфидным сапропелевым грязям и могут использоваться для бальнеологических и косметических целей при широком спектре показаний. Для уточнения рекомендаций к применению грязей в лечебно-профилактических целях необходимо проведение дополнительных экспериментально-клинических исследований.

**Ключевые слова:** сапропель, морфология озера, геохимия, Камчатка, бальнеология.

*Для цитирования:* Жарков Р.В., Козлов Д.Н., Челнокова Б.И. Физические и химические особенности сапропелевых грязей некоторых пресноводных озер Елизовского района Камчатского края (Россия). *Геосистемы переходных зон.* 2019. Т. 3, № 4. С. 438–447. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.438-447>

## Physical and chemical features of some freshwater lakes in the Elizovo district of the Kamchatka (Russia)

Rafael V. Zharkov\*<sup>1</sup>, Dmitry N. Kozlov<sup>1</sup>, Berta I. Chelnokova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Medical Climatology and Rehabilitation Treatment, Vladivostok, Russia

\*E-mail: rafael\_zharkov@mail.ru

**Abstract.** Firstly, the data on the physical and chemical properties of sapropel mud and morphology of the bottom of several freshwater lakes of the central part of Elizovo district of the Kamchatka have been represented. The Ovalnoe and Sinichkino lakes (district of Petropavlovsk-Kamchatsky city), the Lesnoe lake (district of Paratunka village) and unnamed lake 2.5 km south of Malki village were explored in 2016. The aim of the research was to study the features of the physical and chemical properties of sapropels and to assess the prospects for balneotherapeutic and cosmetological use. The sapropel mud of the unnamed lake in the Malki village area was the most promising among the lakes surveyed. Physical indices of this dirt comply with the basic standards for therapeutic sapropel mud: humidity 71.28–95.27 %, volume weight 1.13–1.14 g/cm<sup>3</sup>, shear resistance value is 1128–1619 dine/cm<sup>2</sup>, heat capacity 0.95–0.98 cal/g·deg, tackiness at 25 °C is 2556–3714 dine/cm<sup>2</sup>. The composition of mud solution

is characterized as sulphate-hydrogen carbonate magnesium-sodium calcium. A content of biologically active elements is low ( $I - 0.05 \text{ mg/dm}^3$ ;  $Br - 0.085 \text{ mg/dm}^3$ ;  $B < 0.05 \text{ mg/dm}^3$ ;  $H_2SiO_3 - 40.6 \text{ mg/dm}^3$ ). By the sum of mineral substances ( $M - 0.059 \text{ g/dm}^3$ ) the mud solution refers to fresh, the pH of the mud is 5.2–7.2, Eh reaches  $-100 \text{ mV}$ . Natural mud of the nameless lake located in the area of Malki village refers to therapeutic freshwater sulfide sapropel mud and can be used for balneological and cosmetic purposes with a wide range of indications. Additional experimental and clinical studies are necessary for the correct use of therapeutic dirt for therapeutic purposes..

**Keywords:** sapropel, lake morphology, geochemistry, Kamchatka, balneology.

*For citation:* Zharkov R.V., Kozlov D.N., Chelnokova B.I. Physical and chemical features of some freshwater lakes in the Elizovo district of the Kamchatka (Russia). *Geosystems of Transition Zones*. 2019, vol. 3, no. 4, pp. 438–447. (In Russian) <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.438-447>

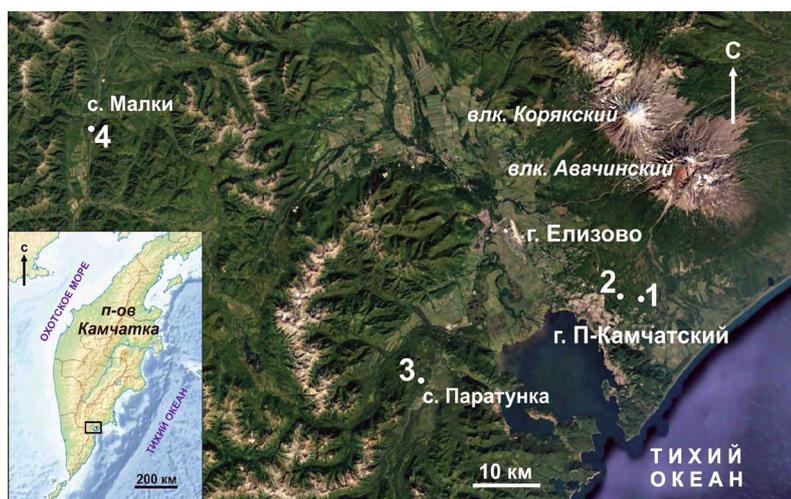
## Введение

Исследования озерных отложений в бальнеотерапевтических и косметологических целях в последние десятилетия стали активно развиваться, особенно на Дальнем Востоке России [Глотов, Глотова, 2007; Челнокова и др., 2010; Мурадов, Рогатых, 2013; Оказание услуг... , 2014; Челнокова, Гвозденко, 2017; Жарков, 2019].

В июле–августе 2016 г. по заказу ООО «Натура Сиберика» (Natura Siberica, г. Москва) авторами проведены комплексные исследования сапропелевых грязей пресных озер п-ова Камчатка в отношении перспектив бальнеотерапевтического и косметологического использования. Единственное известное на Камчатке грязевое месторождение «Озеро Утиное» расположено в районе с. Паратунка, в заболоченной пойме р. Паратунка.

Месторождение хорошо изучено [Мурадов, 2000; 2013; 2018; Ступникова и др., 2003; Ступникова, Мурадов, 2005; Мурадов, Рогатых, 2013; Челнокова и др., 2010], используется в бальнеотерапии. Утвержденные запасы лечебной сульфидной грязи оцениваются приблизительно в  $78\,000 \text{ м}^3$ . В задачи наших исследований входил поиск пресных неглубоких озер с сапропелевыми грязями, ранее в бальнеотерапевтических и косметологических целях не использовавшимися. Озера должны находиться в районах населенных пунктов, чтобы была возможность для подъезда транспорта. Необходимо было обследовать несколько озер и среди них выбрать одно с наиболее благоприятными условиями для отбора грязей и соответствующими физико-химическими свойствами.

В процессе полевых работ по рекомендациям ООО «Натура Сиберика» обследованы озера в районе г. Петропавловск-Камчатский (оз. Овальное и оз. Синичкино), с. Паратунка (оз. Лесное) и безымянное озеро в 2.5 км южнее с. Малки и Малкинских термальных источников (рис. 1). Сапропелевые грязи безымянного озера в районе с. Малки оказались более представительными среди выбранных объектов и использовались для дальнейших лабораторных физико-химических исследований и оценки перспективности их практического применения. Поэтому в статье приведены результаты полного анализа проб только по данному озеру.



**Рис. 1.** Схема расположения исследуемых озер п-ова Камчатка (космический снимок Google Earth от 07.02.2011 г.). 1 — оз. Овальное и 2 — оз. Синичкино в районе г. Петропавловск-Камчатский; 3 — оз. Лесное в районе с. Паратунка; 4 — безымянное озеро в районе с. Малки.

## Методы и материалы

Научно-исследовательские работы состояли из полевого и лабораторного этапов. В процессе полевых работ на выбранных пресноводных озерах Камчатки проведен поиск и отбор сапропелевых грязей, которые в последующем были отправлены в аккредитованные испытательные лаборатории. Акватории озер обследовались на надувной лодке, пробы донных отложений поднимали со дна почвенным буром. Для определения глубин и морфологических особенностей дна, которые могут указывать на наличие мощных сапропелевых отложений, использовали методику батиметрической съемки при помощи цифрового эхолота с синхронной спутниковой привязкой по профилю. Эта современная методика, широко применяемая для исследований водоемов и водотоков [Рянжин и др., 2010; Гринь, Мурзинцев, 2011; Иванов, 2011; Tibor et al., 2014; Лопаткин, Шерстянкин, 2015; Florinsky, 2016; Bouvet et al., 2019], была успешно апробирована авторами на озерах Курило-Камчатского региона [Козлов, Жарков, 2010; Козлов, 2015; Козлов и др., 2018]. Излучатель цифрового эхолота Lowrance 527 CDF-iGPS устанавливался на транце лодки и работал на частоте 200 кГц, шаг промеров составлял около 1 м. При камеральной работе данные промеров глубин и координаты обрабатываются и интерпретируются при помощи программного обеспечения Lowrance Sonar Viewer и визуализируются в ПО Surfer.

В результате предварительных рекогносцировочных работ для каждого озера были определены участки с наиболее мощными отложениями сапропелей и отобраны пробы грязей для последующего физико-химического, микробиологического и радиологического исследований. Микробиологические и радиологические анализы сапропелей всех исследованных озер были сделаны по стандартным методикам в ИЛЦ ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Камчатском крае» (г. Петропавловск-Камчатский, Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.510191). Краткий физико-химический анализ грязи и количественный химический анализ грязевого отжима пробы безымянного озера, располо-

женного в районе с. Малки, были выполнены в Центральной лаборатории АО «Дальневосточное ПГО» (г. Владивосток, Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.512383). На основе полученных результатов Владивостокским филиалом Дальневосточного научного центра физиологии и патологии дыхания – Научно-исследовательским институтом медицинской климатологии и восстановительного лечения разработано бальнеологическое заключение на лечебные сапропелевые грязи озера в районе с. Малки и даны рекомендации по их практическому использованию. Рекомендации даны исходя из методических указаний [Классификация минеральных... , 2000], которые отменены в 2007 г., но за неимением других действующих указаний неформально используются. В настоящее время обсуждается утверждение и издание новых методических указаний, которые будут основаны на материалах из [Классификация минеральных... , 2000].

## Результаты и обсуждение

Общая морфометрическая характеристика озерных котловин и внешние признаки сапропелевых грязей озер Овальное, Синичкино и Лесное представлены в виде сводной таблицы (табл. 1). Также в ней приведены данные о микробиологических показателях и радиоактивности сапропелевых грязей. Химический состав грязевого отжима для этих озер не исследовался. Сапропелевые грязи безымянного озера в районе с. Малки, рекомендуемые к разработке, описаны отдельно и более детально.

*Озеро Овальное* расположено в 8.5 км северо-восточнее административного центра г. Петропавловск-Камчатский. Озеро размерами 320 × 450 м вытянуто в широтном направлении (рис. 2). Максимальная глубина достигает 1.8 м в центральной части озера, средняя глубина 1.2–1.4 м (рис. 2). Наиболее мощные отложения сапропели (5–10 см) находятся в северной заболоченной части озера, в южной части на дне распространены пески и мелкообломочный галечник.

*Озеро Синичкино* находится в 7 км от административного центра г. Петропавловск-Камчатский, в 2.7 км западнее оз. Овальное.

Озеро имеет округлую форму диаметром около 500 м (рис. 3). Максимальная глубина озера – 2 м, средняя глубина 1.2–1.4 м (рис. 3). Наиболее мощные отложения сапропелей (20–30 см) находятся в центральной и северной частях озера. Внешние признаки сапропелей (табл. 1) схожи с грязью оз. Овальное.

В районе с. Паратунка, где расположено известное месторождение лечебных грязей оз. Утиное, обследовались оз. Глухое и оз. Лесное. Сапропелевые грязи оз. Глухое были маломощные и перемежались с прослоями песков, что делало отбор чистых проб невозможным. Для отбора проб иловых грязей больше подходило оз. Лесное. Озеро

имеет размеры 300 × 250 м, на берегу его расположен детский оздоровительный лагерь и дачный массив (рис. 4). Глубина озера достигает 2.4 м (рис. 4). Наиболее мощные отложения (20–50 см) находятся в центральной и северной частях озера. Не все микробиологические показатели грязей соответствуют нормам: энтерококки – 70 КОЕ (табл. 1). Присутствие энтерококков, которые при гигиеническом нормативе должны отсутствовать, может быть связано с попаданием в озеро канализационных вод. Использование этих грязей и купание в озере не рекомендуются по микробиологическим показателям.

В 2.5 км южнее с. Малки расположено *безымянное озеро*. От центра г. Петропавловск-

Таблица 1. Морфометрические характеристики озерных котловин и внешние признаки сапропелевых грязей озера Овальное, Синичкино и Лесное (Камчатский край)

Показатель	Озеро		
	Овальное	Синичкино	Лесное
Размеры, м	320 × 450	500 × 500	300 × 250
Глубина максимальная (средняя), м	1.8 (1.2–1.4)	2 (1.2–1.4)	2.4
Общий объем сапропелей, м <sup>3</sup>	5 000	10 000	2 000
Внешние признаки грязи	Цвет коричневый, консистенция желеобразная, слабопластичная, грязевая масса с включениями песка, фрагментов ракушек и растительных остатков, со слабым запахом сероводорода		Цвет коричневый (с зеленоватым оттенком), консистенция желеобразная, слабопластичная, с включениями песка, фрагментов ракушек и растительных остатков, с сильным запахом сероводорода
Микробиологические показатели*			
ОМЧ	< 1.0 × 10 <sup>2</sup>		4.9 × 10 <sup>3</sup>
титр ЛКП	10		10
титр клостридий	0.1		0.1
патогенные стафилококки	Не обн.		Не обн.
фекальные колиформы	– « –		– « –
<i>P. aeruginosa</i>	– « –		– « –
<i>S. aureus</i>	– « –		– « –
энтерококки	– « –		70 КОЕ
Радиоактивность**, Бк/кг			
цезий-137 ( <sup>137</sup> Cs)	0.9	3.1	0.0
калий-40 ( <sup>40</sup> K)	20.7	23.9	0.0
радий-226 ( <sup>226</sup> Ra)	2.0	2.4	1.5
торий-232 ( <sup>232</sup> Th)	0.0	0.0	0.0

\* методы исследования и нормирование по МР № 96/225 от 1997 г. и МУК 4.2.1018-01, МУ № 143-91/316-17.

\*\* нормирование по НРБ-99/2009 «Нормы радиационной безопасности» и Письму Федеральной службы Роспотребнадзора № 0100/9009-06-032 от 02.08.2006 г.

Примечания. ОМЧ (общее микробное число) – гигиенический норматив не более 500 000 клеток в 1 г естественного вещества; титр ЛКП (лактозо-положительные кишечные палочки) – гигиенический норматив ≥10 г естественного вещества на 1 бактерию; титр клостридий – гигиенический норматив ≥0.1 г естественного вещества на 1 бактерию; патогенные стафилококки, фекальные колиформы, *P. aeruginosa*, *S. aureus*, энтерококки – отсутствие бактерий в 10 г естественного вещества; КОЕ (колониобразующие единицы) – показатель количества жизнеспособных бактерий в 10 г естественного вещества.

Камчатский до берега озера можно проехать 120 км по асфальтированной дороге. Размеры озера составляют 750 × 350 м (рис. 5). Максимальная глубина достигает 2.6 м, средняя глубина 1.5–2.0 м (рис. 5). Сапропелевые грязи встречаются небольшими участками, наиболее мощные отложения (до 20 см) обнаружены в северо-западной части, откуда и были отобраны пробы. Общий объем сапропелей можно оценить примерно в 300–400 м<sup>3</sup>.

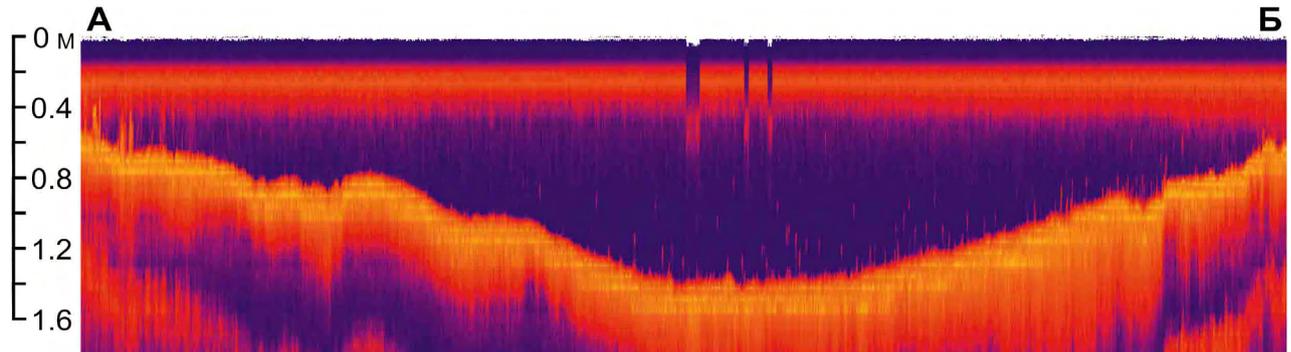


Рис. 2. Озеро Овальное (космический снимок Google Earth от 22.03.2018 г.) и эхолотный профиль А–Б через озеро.

*Внешние признаки* сапропелевой грязи безымянного озера в районе с. Малки: однородная желеобразная грязевая масса, темно-коричневая, имеет слабый исчезающий запах сероводорода. Физико-химические показатели (табл. 2) соответствуют основным нормам для лечебных сапропелевых грязей. Влажность исследуемой грязи варьирует от 71.28 до 95.27 % и близка к пределу требований, предъявляемых к пресноводным бессульфидным грязям (75–90 %); объемный вес (1.13–1.14 г/см<sup>3</sup>) соответствует норме (1.0–1.2 г/см<sup>3</sup>); величина сопротивления сдвигу (1128–1619 дин/см<sup>2</sup>) соответствует норме (1000–2000 дин/см<sup>2</sup>) для грязей, подготовленных к процедурам; теплоемкость (0.95–0.98 кал/г·град) в исследуемых сапропелевых грязях (при нор-

ме 0.8–0.9 кал/г·град) также позволяет использовать их для аппликаций на кожные покровы; липкость при 25 °С составляет 2556–3714 дин/см<sup>2</sup>. Засоренность минеральными включениями диаметром >0.25 мм – 0.68 % (на сырую грязь), характер засоренности – песок,

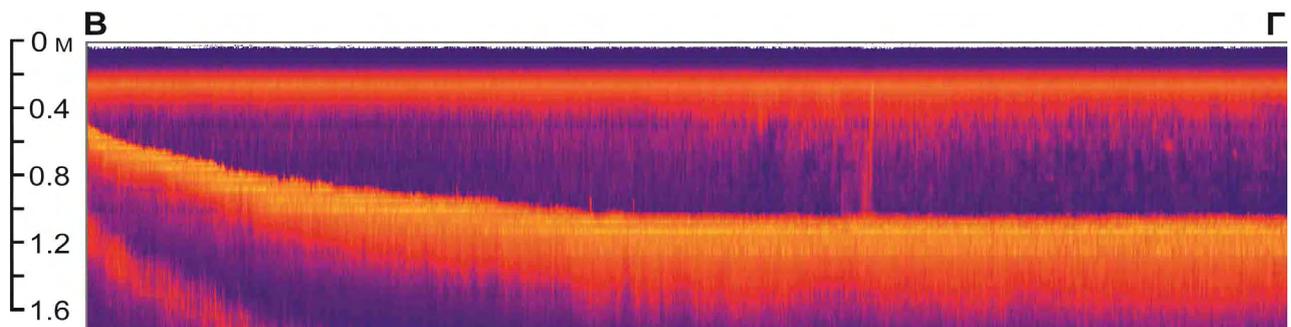


Рис. 3. Озеро Синичкино (космический снимок Google Earth от 22.03.2018 г.) и эхолотный профиль В–Г через озеро.



Концентрация микроэлементов в исследуемой грязи (табл. 2) не превышает средней распространенности химических элементов в земной коре. Содержание биологически активных элементов (в мг/дм<sup>3</sup>): йод I – 0.05; бром Br – 0.085; бор B < 0.05; метакремниевая кислота H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> – 40.6 при норме не менее 50 мг/дм<sup>3</sup>. Состав грязевого раствора (в мг-экв %) характеризуется как сульфатно-гидрокарбонатный (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> – 54; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – 35)

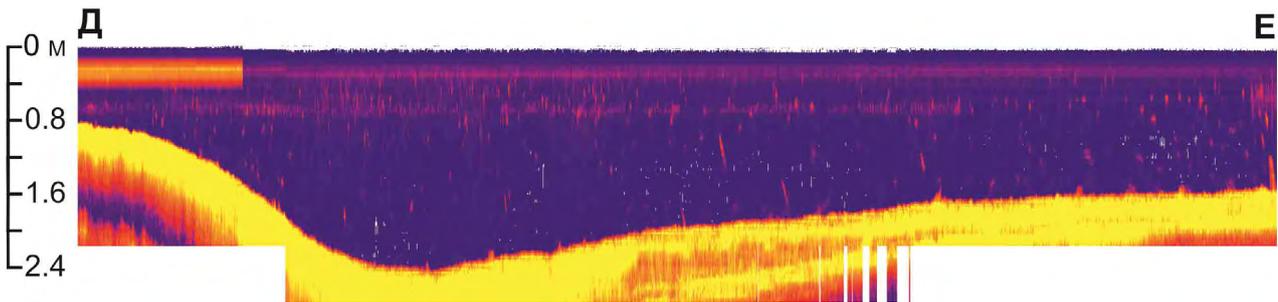


Рис. 4. Озеро Лесное (космический снимок Google Earth от 25.04.2017 г.) и эхолотный профиль Д–Е озера в районе отбора проб.

растительные остатки, очень мелкая дресва, фрагменты ракушек; минеральные включения размером >5.0 мм отсутствуют. По сумме минеральных веществ (М – 0.059 г/дм<sup>3</sup> при норме для минеральных грязей <1.0 г/дм<sup>3</sup>) грязевой раствор относится к пресному, рН грязи 5.2–7.2, Eh достигает –100 mV.

магниево-натриево-кальциевый (Ca<sup>2+</sup> – 44; Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup> – 31; Mg<sup>2+</sup> – 20; NH<sub>4</sub> – 5) с нейтральной реакцией среды (рН 7.18).

Тяжелые металлы в сапропелевой грязи озера содержатся в небольших количествах (табл. 3), за исключением цинка, меди и кобальта, концентрации которых превышают ПДК [Предельно допустимые... , 2006] и ОДК [Ориентировочно-допустимые... , 2006] в почвах.

В российских нормах нет разделения на природные и техногенные доли тяжелых металлов, в ПДК и ОДК используются фиксированные значения концентраций тяжелых металлов в почвах. При этом не учитываются региональные природно-климатические и геохимические особенности,

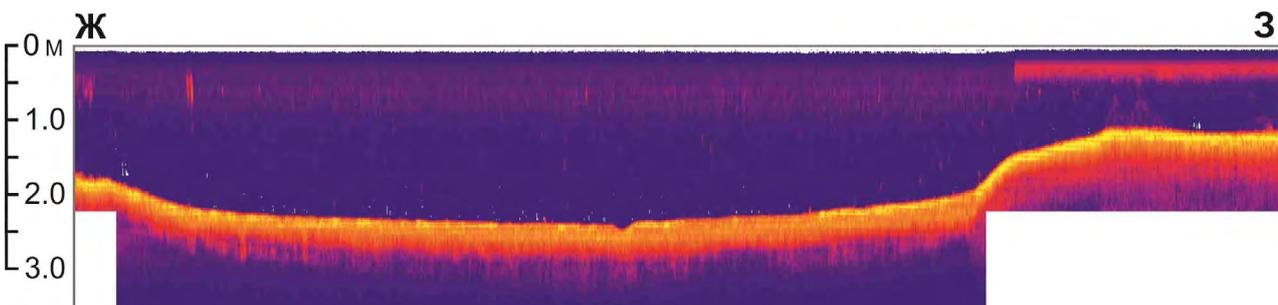


Рис. 5. Безымянное озеро в районе с. Малки (космический снимок SAS.Planet/Bing Maps) и эхолотный профиль Ж–З озера.

Таблица 2. Физические характеристики и химический состав сапропелевых грязей безымянного озера в районе с. Малки (Камчатский край)

<i>Общие свойства грязи</i>			
Показатель	Норма	Факт	
Консистенция, цвет, запах		Однородная, темно-коричневая, слабый запах сероводорода	
Влажность, %	25–75	71.28–95.26	
Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	1.0–1.2	1.13–1.14	
Сопротивление сдвигу, дин/см <sup>2</sup>	1500–4000	1128–1619	
Липкость при 25 °С, дин/см <sup>2</sup>	–	2556–3714	
Засоренность минеральными частицами диаметром >0.25 мм, %	≤ 3	0.68–1.87	
в т.ч. минеральные включения >5 мм (%)	Нет	Нет	
Характер засоренности		Песок, растительные остатки, мелкая дресва и фрагменты ракушек	
рН грязи	6–9	5.2–7.18	
Eh грязи, mV	–	–100	
Теплоемкость, кал/(г·°С)	–	0.95–0.98	
<i>Состав грязи</i>			
Кристаллический скелет, в том числе гипс (CaSO <sub>4</sub> × 2H <sub>2</sub> O) карбонат кальция (CaCO <sub>3</sub> ) карбонат магния (MgCO <sub>3</sub> )	На сухое вещество, %		
	0.5		
	0.32		
	0.066		
Глинистый остов, в т.ч. силикатных частиц диаметром: > 0.25 мм 0.25–0.1 мм 0.1–0.05 мм 0.05–0.01 мм 0.01–0.005 мм 0.005–0.001 мм < 0.001 мм Сумма составных частей Навеска остова	Масса частиц на 100 г сырой грязи, г	Масса частиц на навеску, г	
	1.70	0.34	
	5.70	1.14	
	61.60	12.32	
	0.22	0.045	
	0.21	0.045	
	0.12	0.024	
	0.06	0.012	
	8.00	1.60	
	69.65	13.93	
Сульфиды (сульфид железа FeS), в т.ч. H <sub>2</sub> S	Не опр.		
Продукты разрушения HCl (в %), в том числе окись кремния SiO <sub>2</sub> окись железа Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> окись алюминия Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> органическое вещество (по Кноперу, %)	0.51		
	0.34		
	3.67		
	25.0		
<i>Состав грязевого отжима</i>			
Показатель	мг/дм	мг-экв	мг-экв %
<i>Катионы</i>			
натрий + калий (Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup> )	3.60	0.11	31
кальций Ca <sup>2+</sup>	3.9	0.19	44
магний Mg <sup>2+</sup>	1.3	0.09	20
аммоний NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.36	0.02	5
закисное железо Fe <sup>2+</sup>	< 0.05	–	–
окисное железо Fe <sup>3+</sup>	< 0.05	–	–
Сумма катионов	9.16	0.43	100
<i>Анионы</i>			
хлор Cl <sup>-</sup>	2.7	0.07	11
бром Br <sup>-</sup>	0.085	–	–
йод I <sup>-</sup>	< 0.05	–	–
сульфат SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	11.4	–	–
нитрат-ион NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	< 0.2	0.35	54
гидрокарбонат HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	21.4	–	–
карбонат CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	< 6.0	–	–
бор B <sup>-</sup>	< 0.05	–	–
Сумма анионов	35.5	0.65	100
Метакремниевая кислота H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	40.6		
Минерализация	58.86		
рН – 7.18			

поэтому часто завышается опасность загрязнения на территории положительной геохимической аномалии и занижается опасность на участках отрицательной природной аномалии. Более правильный подход был применен в СанПиН 42-128-4433-87 [СанПиН... , 1988] для нескольких тяжелых металлов, при котором использовались гибкие критерии ПДК, учитывающие предельно допустимую добавку (ПДД) тяжелого металла как поллютанта. Использование переменной природной и техногенной допустимой доли металлов позволяет определить локальное значение ПДК/ОДК и устранить недостатки нормативов, связанные с применением фиксированных чисел. При использовании предельно допустимой добавки исключается результат, когда фоновое содержание металла превышает ПДК/ОДК. Также нормативы не учитывают такой важный фактор, как возраст загрязнения, хотя часто со временем подвижность и, следовательно, опасность поллютанта снижается. Таким образом, содержание тяжелого элемента в почве выше ПДК/ОДК еще не означает ее загрязненность [Водяницкий, 2011, 2012].

Другая проблема с превышением токсичных элементов в потенциально лечебных грязях заключается в том, что они нормируются к почвам, что не совсем верно. Лечебные грязи используются, как правило, для кратковременного нанесения на кожные покровы, поэтому для них должны быть разработаны особые ПДК/ОДК, учитывающие способность конкретных токсичных элементов негативно воздействовать на организм человека при наружном применении. На сегодняшний день таких нормативных документов нет.

*Бактериологические показатели* исследуемой сапропелевой грязи соответствуют требованиям и нормам МР № 96/225 от 1997 г.

и МУК 4.2.1018-01, МУ № 143-91/316-17: ОМЧ менее  $1.0 \times 10^2$  клеток в 1 г естественного вещества; титр ЛКП – 10 г естественного вещества на 1 бактерию; титр клостридий – 0.1 г естественного вещества на 1 бактерию; патогенные стафилококки, фекальные колиформы, энтерококки, *P. aeruginosa*, *S. aureus* – отсутствуют. Радиоактивность находится в пределах установленных норм НРБ-99/2009 «Нормы радиационной безопасности» и Письма Федеральной службы Роспотребнадзора № 0100/9009-06-032 от 02.08.2006 г. Содержание радиоактивных веществ в исследуемой грязи (Бк/кг):  $^{137}\text{Cs}$  – 0.0;  $^{40}\text{K}$  – 32.3;  $^{226}\text{Ra}$  – 3.1;  $^{232}\text{Th}$  – 0.0.

**Бальнеологический и косметологический потенциал.** Сапропелевые пресноводные бессульфидные иловые грязи озера в районе с. Малки Камчатского края по аналогии с другими природными лечебными грязями [Классификация минеральных... , 2000; Герасименко и др., 2018], предположительно, могут оказывать выраженное терапевтическое воздействие: противовоспалительное, заживляющее, болеутоляющее, расслабляющее, восстанавливающее минеральный баланс организма. Их бальнеологическая ценность обусловлена относительно высокими вязко-пластичными и тепловыми свойствами, повышенным содержанием органики, обогащающей грязи биологически активными компонентами – липидами, витаминами, ферментами и гормонами. Согласно [Классификация минеральных... , 2000], исследованные сапропели имеют следующие медицинские показания к наружному применению: 1) болезни системы кровообращения: гипертоническая болезнь, ишемическая болезнь сердца; болезни периферических артерий и вен;

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов в пробе грязей озера в районе пос. Малки

Элемент	В почвах, мг/кг	В пробе, мг/кг сухого пелоида
Zn	220 (ОДК)	347.33
Mn	1500 (ПДК)	87.08
Cu	132 (ОДК)	430.37
Hg	2.1 (ПДК)	0.14
Co	5.0 (ПДК)	5.65
Pb	32 (ПДК), 130 (ОДК)	7.36
Cd	2.0 (ОДК)	0.31

2) болезни нервной системы, в том числе воспалительные заболевания центральной нервной системы, расстройства вегетативной нервной системы; 3) болезни костно-мышечной системы; 4) болезни верхних и нижних дыхательных путей; 5) болезни органов пищеварения; кишечника; печени; желчного пузыря, желчевыводящих путей и поджелудочной железы; последствия оперативных вмешательств и воспалительных процессов в брюшной полости; 6) болезни мочеполовой системы; 7) болезни уха и носоглоточного отростка; 8) болезни кожи.

В косметологии использование подобных сапропелевых лечебных грязей (натуральных или в составе препаратов, кремов и т.п.) при аппликациях на кожу способствует [Карагулов, Евсеева, 2015; Герасименко и др., 2018] всасыванию в клетки ионных минеральных и органических веществ, усиливает обменные процессы, восстанавливает электрический потенциал клеток, повышает проницаемость клеточных мембран, связывает белки и выводит их с поверхности кожи. Это усиливает микроциркуляцию кожи, восстанавливает тонус и упругость кожи, имеет очищающий и омолаживающий эффект.

Для уточнения клинических рекомендаций использования грязей в лечебно-профилактических целях необходимы комплексные экспериментально-клинические испытания под руководством специалистов аккредитованных организаций. На Дальнем Востоке России такой организацией является Владивостокский филиал Дальневосточного научного центра физиологии и патологии дыхания – Научно-исследовательского института медицинской климатологии и восстановительного лечения [Челнокова, Гвозденко, 2017].

## Выводы

Сапропелевые лечебные грязи пресных озер п-ова Камчатка практически не изучены, несмотря на большой потенциал их бальнеотерапевтического и косметологического использования. В 2016 г. в результате проведенных авторами научно-исследовательских работ по оценке физических и химических свойств лечебных грязей получены новые данные

по нескольким озерам Елизовского района Камчатского края. Озера Овальное и Синичкино (район г. Петропавловск-Камчатский), оз. Лесное (район с. Паратунка) и безымянное озеро в 2.5 км южнее с. Малки имеют сходную морфологию неглубоких озерных котловин (до 2–2.6 м) и схожие по внешним признакам и мощности отложения сапропелевых пресных грязей. Сапропелевые грязи безымянного озера, расположенного в районе с. Малки, оказались наиболее перспективными для детальных физико-химических исследований и оценки практического применения. Натуральные грязи этого озера относятся к лечебным пресноводным ( $M = 0.059$  г/л, рН 5.2–7.2) бессульфидным сапропелевым грязям и могут использоваться для бальнеологических и косметических целей при широком спектре показаний. Для уточнения рекомендаций к применению грязей в лечебно-профилактических целях необходимо проведение экспериментально-клинических исследований.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН и Договора № 07/2016 от 05 июля 2016 г. с ООО «Натура Сиберика».*

## Список литературы

1. Водяницкий Ю.Н. Концепция гибкого подхода к оценке ориентировочно допустимой концентрации тяжелых металлов и металлоидов в почве // *Бюл. Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2011. Вып. 67. С. 49–66.
2. Водяницкий Ю.Н. Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах // *Почвоведение*. 2012. № 3. С. 368–375.
3. Герасименко М.Ю., Астахов П.В., Бадалов Н.Г. и др. Пелоидотерапия в лечебно-реабилитационных и профилактических программах: клинические рекомендации // *Физиотерапия, бальнеология и реабилитация*. 2018. Т. 17, № 1. С. 40–48.
4. Глотов В.Е., Глотова Л.П. Особенности распространения бальнеологических ресурсов Северо-Востока России // *Вестник ДВО РАН*. 2007. № 6. С. 79–94.
5. Гринь Г.А., Мурзинцев П.П. О применении современных технических средств для высокоточной съемки рельефа дна и подводных объектов // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2011. № 1. С. 102–107.
6. Жарков Р.В. Физико-химические свойства и перспективы использования сапропелевых грязей озера Большое Чибисанское (остров Сахалин) = Zharkov R.V. Physical and chemical properties and prospects of use of sapropelic mud of the Bolshoe Chibisanskoe Lake (Sakhalin Island) // *Геосистемы переходных зон*. 2019. Т. 3, № 3. С. 318–324. doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.318-324

7. Иванов Г.Н. Применение методов локации для изучения и разведки торфяных и сапропелевых отложений // *Труды Инсторфа*. 2011. Т. 56, № 3. С. 39–52.
8. Карагулов Х.Г., Евсеева С.Б. Косметические средства на основе лечебных грязей: состав и технологические особенности // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1 (ч. 1). URL: [www.science-education.ru/121-17850](http://www.science-education.ru/121-17850)
9. Классификация минеральных вод и лечебных грязей для целей их сертификации: Методические указания № 2000/34 / А.Н. Разумов, В.Б. Адилов, О.Б. Давыдова и др. М.: РНЦ ВМиК, 2000. 150 с.
10. Козлов Д.Н. *Кратерные озера Курильских островов*. Южно-Сахалинск: Сахалин. обл. краеведч. музей, ИМГиГ ДВО РАН, 2015. 112 с.
11. Козлов Д.Н., Дегтерев А.В., Зарочинцев В.С. Кальдерное озеро Кольцевое: современное состояние и строение котловины (о. Онекотан, Курильские острова) = *Kozlov D.N., Degterev A.V., Zarochintsev V.S. Koltsevoe caldera lake: current state and structure of the basin (Onkotan Island, Kuril Islands)* // *Геосистемы переходных зон*. 2018. Т. 2, № 4. С. 359–364. doi: 10.30730/2541-8912.2018.2.4.359-364.
12. Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Морфология и генезис озер кальдерных комплексов Головинина и Заварицкого (Курильские острова) // *Вестник ДВО РАН*. 2010. № 3. С. 103–106.
13. Лопаткин Д.А., Шерстянкин П.П. Геоинформационное картографирование рельефа дна озера Байкал // *Геодезия и картография*. 2015. № 3. С. 22–28. doi:10.22389/0016-7126-2015-897-3-22-28
14. Мурадов С.В. Влияние минеральных вод Паратунского гидротермального месторождения на численность и геохимическую активность микроорганизмов илового сульфидного пелоида // *Успехи современного естествознания*. 2018. № 5. С. 120–125.
15. Мурадов С.В. Мониторинг санитарно-микробиологического состояния лечебной грязи озера Утинового (Камчатский край) за 50 лет эксплуатации месторождения // *Фундаментальные исследования. Биологические науки*. 2013. № 6. С. 913–917.
16. Мурадов С.В. *Формирование и биологическая активность грязе-илового пелоида*. Владивосток: Дальнаука, 2000. 93 с.
17. Мурадов С.В., Рогатых С.В. Физико-химические свойства растворов лечебной грязи и основы технологии получения пелоидных препаратов // *Научно-технический вестник Поволжья. Технические науки*. 2013. № 3. С. 214–217.
18. *Оказание услуг по созданию кадастра рекреационных ресурсов, проведение комплексного исследования и производства работ в области разведки и использования имеющихся природных ресурсов Сахалинской области: отчет о науч.-исслед. работе / исполн. Р.В. Жарков*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2014. 268 с. Инв. № 3664 (фонды ИМГиГ ДВО РАН).
19. *Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве; Гигиенические нормативы*. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 11 с.
20. *Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы*. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с.
21. Рянжин С.В., Субетто Д.А., Кочков Н.В., Ахметова Н.С., Вейнмейстер Н.А. Полярные озера мира: современные данные и состояние исследований // *Водные ресурсы*. 2010. Т. 37, № 4. С. 387–397.
22. СанПиН 42-128-4433-87. *Санитарные нормы допустимых концентраций (ПДК) химических веществ в почве*. М., 1988. 55 с.
23. Ступникова Н.А., Мурадов С.В. Физико-химические и микробиологические исследования лечебной грязи месторождения Озеро Утиное Камчатской области // *Вестник ДВО РАН*. 2005. № 3. С. 76–82.
24. Ступникова Н.А., Христофорова Н.К., Мурадов С.В. Месторождение лечебной грязи «Озеро Утиное»: условия формирования и оценка состояния при антропогенном воздействии // *География и природные ресурсы*. 2003. № 4. С. 39–43.
25. Челнокова Б.И., Гвозденко Т.А. *Минеральные воды и лечебные грязи Дальнего Востока: справочник*. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2017. 220 с.
26. Челнокова Б.И., Иванов Е.М., Гвозденко Т.А. *Минеральные воды и лечебные грязи Дальнего Востока: справ.* Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2010. 128 с.
27. Bouvet de Maisonneuve C., Eisele S., Forni F., Hamdi, Park E., Phua M., Putra R. Bathymetric survey of lakes Maninjau and Diatas (West Sumatra), and lake Kerinci (Jambi) // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1185, № 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1185/1/012001>
28. Florinsky I.V. *Digital terrain analysis in soil science and geology*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Acad. Press., 2016. 486 p.
29. Tibor G., Sade R., Hall J.K., Ben-Avraham Z., Nishri A. *Lake bathymetry and bottom morphology // Lake Kinneret*. Springer: Dordrecht, Netherlands, 2014. P. 59–68. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-8944-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8944-8_4)

#### Об авторах

ЖАРКОВ Рафаэль Владимирович (ORCID 0000-0002-9753-0627), кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, КОЗЛОВ Дмитрий Николаевич (ORCID 0000-0002-8640-086X), кандидат географических наук, старший научный сотрудник – лаборатория вулканологии и вулканопасности, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск; ЧЕЛНОКОВА Берта Ивановна (ORCID 0000-0001-7486-2760), кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории медицинской экологии и рекреационных ресурсов, Владивостокский филиал Дальневосточного научного центра физиологии и патологии дыхания – Научно-исследовательский институт медицинской климатологии и восстановительного лечения (Владивостокский филиал ДНЦ ФПД – НИИМКВЛ).

## Правила оформления и публикации рукописей в научном журнале «Геосистемы переходных зон»

E-mail: gtrz-journal@mail.ru

Список научных специальностей, по которым журнал «Геосистемы переходных зон» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук

Шифр	Наименование группы научных специальностей, наименование научной специальности	Наименование отраслей науки, по которым присуждается ученая степень
<b>25.00.00</b>	<b>Науки о Земле</b>	
25.00.01	Общая и региональная геология	Геолого-минералогические
25.00.03	Геотектоника и геодинамика	Геолого-минералогические
25.00.04	Петрология, вулканология	Геолого-минералогические
25.00.10	Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых	Геолого-минералогические; Физико-математические
25.00.25	Геоморфология и эволюционная география	Географические
25.00.28	Океанология	Географические; Геолого-минералогические; Физико-математические
25.00.35	Геоинформатика	Геолого-минералогические; Физико-математические
25.00.36	Геоэкология	Геолого-минералогические; Географические
<b>01.02.00</b>	<b>Механика</b>	
01.02.04	Механика деформируемого твердого тела	Физико-математические; Технические

*График выхода журнала:* № 1 – март; № 2 – июнь; № 3 – сентябрь; № 4 – декабрь.

Журнал публикует оригинальные и обзорные научные статьи, краткие научные сообщения, письма с дискуссией по статьям, рецензии на научные издания, а также сообщения о конференциях, семинарах, экспедициях, об изданной научной литературе.

Научным статьям и сообщениям присваивается идентификатор CrossRef – DOI (Digital Object Identification).

Рукописи принимаются в электронной форме в течение года по адресу редакции журнала или по e-mail: gtrz-journal@mail.ru. Заказные и ценные письма и бандероли редакция не получает.

В журнале принято *одностороннее слепое рецензирование* (подробнее о порядке рецензирования см. на сайте журнала). В качестве рецензентов выступают известные специалисты по данному направлению, имеющие публикации по тематике статьи и необходимый уровень цитирования.

Выбор рецензента – прерогатива редколлегии, но авторы могут указать в сопроводительном письме желательных рецензентов (3–6 человек: минимум из 2 разных регионов или разных стран; эксперты в данной области; отсутствие сотрудничества, в том числе соавторства за последние 3 года; не члены редколлегии журнала), а также тех, кому не рекомендуется отправлять работу ввиду возможного конфликта интересов.

Если статья не отвечает тематике журнала, не содержит предмета научного исследования, не соответствует этическим требованиям, дублирует опубликованные материалы, логически не выстроена, изложена неудобоваримым языком и т.п., редакция может аргументированно отказать автору в публикации на основании первичного скрининга, до проведения рецензирования.

Решение о публикации принимает редакционная коллегия в течение 3–4 месяцев со дня получения материалов на основании минимум 2 рецензий. Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

Статью с копиями рецензий и редакционными замечаниями высылают автору. Возвращение рукописи на доработку не означает принятия ее к публикации. Вся дальнейшая работа над статьей идет в редакционном файле, в котором автор дорабатывает текст и присылает его вместе с ответным письмом.

Ответное письмо следует писать в файле с рецензией или редакционным заключением. В нем нужно:

- ответить на каждый комментарий рецензентов;
- указать конкретно, какие именно изменения внесены в статью;
- написать убедительное, вежливое возражение, если, по мнению автора, рецензент неправ.

Редколлегия на основании рецензий и ответной реакции автора определяет дальнейшую судьбу рукописи.

Принятую к печати статью снова читает редактор и согласовывает с автором правки, связанные с содержанием. Готовый к верстке файл следует внимательно вычитать, поскольку в верстке допускаются только мелкая правка.

Работу включают в план номера. Содержание номера утверждает ответственный за номер и/или главный редактор, за которым остается право отклонить статью по серьезным на то основаниям (конфликт интересов, недостаточный уровень новизны исследования и т.п.). В случае принятия статьи к публикации автору сообщают, в каком номере она будет опубликована.

Авторы статей несут ответственность за содержание статей и факт их публикации, о чем подписывают авторское заявление.

Редакция вправе изъять уже опубликованную статью, если выяснится, что в процессе ее публикации были нарушены чьи-либо права или общепринятые нормы научной этики. О факте изъятия статьи редакция сообщает ее автору, специалистам, давшим рекомендацию или рецензию, организации, где работа выполнялась, и в базу научного цитирования, в которой журнал индексируется.

Публикация статей бесплатна для авторов. По запросу авторов редакция после выхода журнала в свет высылает pdf-файл с опубликованной статьей. Печатные экземпляры издания можно приобрести в редакции или оформив подписку в Агентстве «Роспечать» (индекс 80882). Подписавшиеся на журнал, сделав своевременно по электронной почте запрос в редакцию, получают бесплатно pdf-файл с электронной версией журнала в течение недели после подписания его в печать.

### Структура основного файла

**Тематическая рубрика** из приведенного выше списка специальностей.

**Индекс УДК** по таблицам Универсальной десятичной классификации, имеющимся в библиотеках, или с помощью интернет-ресурса <http://teacode.com/online/udc/>

**Заглавие.** 10–12 слов. Короткое, емкое. По возможности избегайте общих слов, научных жаргонизмов и аббревиатур. В идеале все слова названия могут служить ключевыми при научном поиске.

**Инициалы и фамилии авторов** (отметить звездочкой автора для контактов и указать e-mail для переписки).

**Полные названия учреждений** (как они значатся в Уставе), к которым аффилированы авторы, и их местонахождение (город, страна).

**Реферат (аннотация) – Abstract.** Объем 200–300 слов. Без прочтения всей статьи дает четкое представление о цели статьи, ее научной новизне и достигнутых результатах. Поэтому в нем в лаконичной форме должны быть четко обозначены проблема, обоснование цели, материалы и методы, результаты исследования и их интерпретация, выводы.

Для иностранных ученых абстракт зачастую является единственным источником информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах исследования.

Избегайте пассивных глагольных форм (*The study tested*, но не *It was tested in this study*. *Мы доказали* звучит лучше, чем *Нами доказано*). Классическое безличное *было продемонстрировано, описано* как бы переводит на второй план личную ответственность.

**Ключевые слова** (не более 10, допустимы словосочетания из двух слов) в оптимальном варианте отражают: предмет исследования, методы, объект, специфику данной работы. Используются для индексирования и поиска. Призваны облегчить нахождение статьи в базах данных.

**Сведения о финансовой поддержке работы** (с номерами грантов в скобках) и благодарности.

**Текст статьи** с вставленными в текст иллюстрациями и таблицами в программе Word любой версии без использования макросов. Файл дублируется в pdf.

**Список цитируемых источников.**

**Сведения о всех авторах** (в конце статьи): фамилия, имя, отчество, ученая степень, должность, лаборатория или отдел с полным и сокращенным названием (аббревиатурой) учреждения (как в Уставе), ORCID (Open Researcher and Contributor ID) каждого автора, почтовый адрес, e-mail.

**Отдельными файлами** прилагаются:

- 1) Авторское заявление (форму скачать на сайте журнала);
- 2) скан-копия Экспертного заключения (по форме, принятой в организации автора) о возможности опубликования в открытой печати;
- 3) графические материалы.

На **английском языке** в файле со статьей дублируются:

- заглавие,
- имена и фамилии авторов,
- реферат и ключевые слова,
- подрисуночные подписи,
- заголовки таблиц,
- полные сведения о всех авторах.

Транслитерация элементов (при необходимости) производится согласно системе Библиотеки Конгресса США ([www.convertcyrillic.com/Convert.aspx](http://www.convertcyrillic.com/Convert.aspx)).

**Для лучшего восприятия и цитирования статьи желательно придерживаться четкой структуры, учитывая рекомендации Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ).**

### **Введение**

Осветите следующие вопросы:

- Современные взгляды на проблему.
- Что было сделано ранее (обзор литературы; укажите оригинальные и важные работы, в том числе последние обзорные статьи). Избегайте ссылок на устаревшие результаты. Выделите нерешенные вопросы в пределах общей проблемы.
  - Какова ваша гипотеза, каковы ваши цели (постановка задачи с упором на новизну, четко сформулируйте цель статьи).
  - Что было проделано вами.
  - Каких результатов вы достигли, **что** статья добавляет к уже полученным знаниям. Это может быть изложено в Заключении.

### **Материал (объект) и методы исследования**

Опишите, как вы изучали поставленную проблему.

- Не описывайте процедуры и методы, данные о которых публиковались ранее.
- Укажите применяемое оборудование и опишите использованные материалы.

### **Результаты исследования или Эксперимент (исследование, моделирование и т.п.)**

- Систематизированный авторский аналитический и статистический материал (ключевое слово здесь – систематизированный).
  - Таблицы, графики и текст не должны дублировать друг друга.
  - Рисунки и таблицы – это история исследования. Они должны быть понятными и без текста, таблицы – не перегруженными, всё подписано и на своем месте. **Не забудьте привести подрисуночные подписи и заголовки таблиц помимо русского на английском языке.**

**Обсуждение результатов** – наиболее важный раздел.

- Желательно сравнить результаты с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Самый очевидный способ поднять цитирование – это не только представить свои данные, но и сопоставить их с мировыми или региональными аналогами. Модель и выводы должны быть универсальны с точки зрения восприятия учеными не только вашей специальности. Если модель хорошая, если выводы сделаны и обоснованы правильно, то они должны быть понятны любому.
  - Не стоит игнорировать работы, чьи результаты противоречат вашим – вступите с ними в осторожную конструктивную дискуссию и убедите читателя в своей правоте.
  - Чтобы предвосхитить возможные замечания рецензентов, обсудите ограничения ваших результатов – **что** не удалось сделать и почему.

При необходимости введите тематические подзаголовки, объедините некоторые разделы (Введение и методы, Результаты и обсуждение, Обсуждение и заключение, и т.п.).

**Выводы и Заключение** – это не одно и то же, но их, как правило, объединяют под заголовком Заключение.

**Выводы** лаконично излагают главные результаты, желательно фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи.

Важно: выводы должны четко коррелировать с формулировкой цели и задач работы и с содержанием аннотации.

#### **Заключение**

- Дает ответ на вопросы, **что** нового статья добавляет к уже опубликованным результатам и насколько работа позволяет продвинуться вперед в данной области знаний.
- Предлагает обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивает их практическую значимость, определяет направления для дальнейшего исследования в этой области и, желательно, прогноз развития рассмотренных вопросов.

#### **Список литературы**

Обязательны работы последних 5–10 лет. Не забывайте о работах иностранных коллег. В обзорных статьях наряду с современными, новейшими источниками укажите те, в которых исследуемая тематика была затронута или разработана впервые. Минимизируйте ссылки на учебные пособия, справочники, энциклопедии и т.п., которые не могут быть серьезной основой для научного исследования. Не увлекайтесь самоцитированием, не приводите собственных работ более 20 % от общего числа в списке.

**Данные.** В этом разделе автор может разместить дополнительную информацию – данные экспериментов, вспомогательных методов исследования и тому подобные данные, поддерживающие выводы в статье. По существу, это приложение к статье.

Обширная база данных вкуче с методами их обработки, имеющая самостоятельную научную ценность, может быть опубликована в виде отдельной работы со ссылкой на собственно научную статью, в которой обсуждаются результаты анализа этих данных.

Если результаты эксперимента еще не осмыслены на уровне обобщения, достойном статьи, но представляются важными для решения научной проблемы, оформите их в виде **краткого сообщения** (постановка задачи, экспериментальный материал, выводы, небольшой список литературы).

#### **Что обычно смотрят рецензенты?**

- Прежде всего аннотацию-реферат,
- потом рисунки. Рецензенты с большим стажем выявили корреляцию: если рисунки проблемные, то статья скорее всего тоже вызовет вопросы.

Затем рецензенты проверят:

- насколько точно название отражает содержание статьи;
- четко ли коррелируют выводы с формулировкой цели и задач работы и с содержанием реферата;
- достаточно ли выводы аргументированы представленным материалом;
- качество списка литературы: представительный список литературы демонстрирует профессиональный кругозор авторов и научный уровень исследования.

#### **Основные требования к оформлению статьи**

Формат листа	A4
Поля	по 1,5 см со всех сторон
Шрифты	Times New Roman – для текста, Symbol – для греческих букв
Размер шрифта	12–13
Десятичный символ	точка, а не запятая
Межстрочный интервал	1,15–1,5
Выравнивание текста	по левому краю
Автоматическая расстановка переносов	нет

В русском тексте *все текстовые элементы (включая название статьи), кроме аббревиатур и специальных символов, набираются строчными (не прописными!) буквами.* Используются «кавычки», но не “кавычки”. Буква «ё» везде заменяется на «е», кроме фамилий и особых случаев. Даты в тексте в форме «число.месяц.год» набираются следующим образом: 02.05.1991.

Точка не ставится после: УДК, заглавия статьи, авторов, адресов, заголовков и подзаголовков, названий таблиц, размерностей (с – секунда, г – грамм, мин – минута, ч – час, сут – сутки (но мес. – месяц, г. – год), млн – миллион, млрд и т.п.), в подстрочных индексах ( $T_{пл}$  – температура плавления).

Пробелом отделяются инициалы от фамилии (А.А. Иванов); размерность от цифры: 100 кПа, 77 К, 50 %, 10 ‰, кроме градусов: 90° (но 20 °С); порядковые номера от любого обозначения: рис. 1, fig. 1, табл. 2; знак широты и долготы в географических координатах: 56.5° N; 85.0° E.

Между двумя цифрами ставится не дефис, а тире (одновременным нажатием Ctrl и тире на правой цифровой панели) без пробелов с обеих сторон, например: 1984–1991 гг.; 6–8 м.

Математические формулы, оформляемые отдельной строкой и содержащие знаки, отсутствующие в Times New Roman, должны набираться целиком в редакторе, совместимом с Microsoft Office.

Формулы и символы, которые можно внести в текст, не используя специальный редактор, набираются латиницей и/или через опцию Вставка – Символ.

Таблицы должны быть озаглавлены, в них не должно быть пустых ячеек. Прочерки обязательно поясняются в примечании. При создании таблиц используйте возможности Word (Таблица – Добавить таблицу).

Иллюстративные материалы размещаются по тексту статьи, а также представляются в виде отдельных файлов в той версии, в которой они создавались.

Форматы: для фото, рисунков – jpg (300–600 dpi); для графиков, диаграмм, схем и т.п. – tiff, xls (Excel), cdr (CorelDraw) версий 12.0(2004) или X4(2008).

Размеры рисунков, шрифтов надписей на них должны быть выбраны с учетом уменьшения их в соответствии с размерами полосы (17 × 24 см) и колонки (8 × 24 см).

Надписи на осях начинаются с прописной буквы: Глубина, м. В подрисовочных подписях сначала идет общий заголовок к рисунку, а затем расшифровка частей и легенды. Литеры для обозначения частей рисунка ставятся в скобках: (а), (б) и т.д.

Надписи и символы на всех рисунках в пределах одной статьи должны быть на одном языке: на русском или английском (предпочтительнее на английском). Социальная сеть ученых ResearchGate зачастую предлагает автору добавить отдельно рисунки с подписями на английском языке и комментариями или сопутствующую информацию для ознакомления англоязычного сообщества.

Объем каждого графического файла – не более 10 Мб.

Цветные рисунки принимаются в том случае, когда их нельзя без ущерба для смысла перевести в черно-белые.

В тексте должны быть ссылки на все рисунки.

Величины и единицы измерения должны соответствовать стандартным обозначениям согласно Международной системе единиц СИ.

Список литературы помещается после основного текста статьи, он составляется в алфавитном порядке, вначале источники на русском, затем на иностранных.

В пределах работ одного автора вначале идут работы одного автора, потом этого автора с одним соавтором, затем этого автора с двумя и более соавторами – в каждой группе в хронологическом по возрастанию порядке. Авторы числом до 10 приводятся все.

Курсивом выделяется при описании моноизданий название работы, а в аналитическом описании – название источника. Список нумеруется (см. пример ниже).

В журнале принят стиль библиографических описаний, близкий к стилю Chicago (с элементами стиля APA – American Psychological Association). Обязательные элементы: авторы, год издания, полное наименование книги или статьи, место издания, издательство, название источника в полной форме, том, номер, количественная характеристика (для книги – общее число страниц, для статьи или главы – страницы, на которых она помещена, например: 5–10), идентификатор doi (если имеется). Если источник доступен в интернете, приводится ссылка на URL и дата обращения.

Если статья опубликована в оригинальной и переводной версии, описание статьи дается в обеих версиях. Также очень желательно привести англоязычные данные из оригинала статьи, опубликованной на русском языке (Ф.И.О. авторов на латинице, англоязычное название статьи).

В тексте должны быть ссылки на все приведенные в списке источники.

Ссылки на литературу в тексте даются в квадратных скобках с указанием фамилии автора (или первого автора при трех и более соавторах), фамилий двух соавторов и года выпуска, например: [Петров, 2011; Olami et al., 1992; Левин, Носов, 2009]. В одинаковых ссылках на разные работы одного года и в их описаниях в списке при обозначении года ставятся литеры: [Сим и др., 2016а].

**Пример нумерованного списка литературы**

*Монографическое издание*

1. Родников А.Г., Забаринская Л.П., Рашидов В.А., Сергеева Н.А. **2014**. *Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин*. М.: Научный мир, 172 с.
2. Грачев А.Ф. (ред.) **1998**. *Новейшая тектоника Северной Евразии: Объясн. записка к карте новейшей тектоники Сев. Евразии м-ба 1:5 000 000*. М.: ГЕОС, 147 с.
3. Max M.D. (ed.) **2000**. *Natural gas hydrate*. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Acad. Publ., 410 p. (Oceanic and Permafrost Environments; 5). <https://doi.org/10.1007/978-94-011-4387-5>
4. *IPCC: Climate Change 2013 – The Physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. **2013**. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1535 p. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (accessed 13.11.2019).

*Статья в периодическом издании*

5. Pletchov P.Y., Gerya T.V. **1998**. Effect of H<sub>2</sub>O on plagioclase-melt equilibrium. *Experiment in Geosciences*, 7(2): 7–9. URL: [http://library.iem.ac.ru/exper/v7\\_2/khitar.html#pletchov](http://library.iem.ac.ru/exper/v7_2/khitar.html#pletchov) (accessed 14.11.2019).
6. Elliott S., Maltrud M., Reagan M., Moridis G., Cameron-Smith P. **2011**. Marine methane cycle simulations for the period of early global warming. *J. of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G1): G01010, 13 p. <https://doi.org/10.1029/2010jg001300>
7. Blunden J., Arndt D.S. (eds) **2017**. State of the Climate in 2016. *Bull. of the American Meteorological Society*, 98(8): Si–S277. <https://doi.org/10.1175/2017BAMSStateoftheClimate.1>

*Статья, опубликованная в русской и английской версиях*

8. Щербаков В.Д., Некрылов Н.А., Савостин Г.Г., Попов Д.В., Дирксен О.В. **2017**. Состав расплавных включений в минералах тефр почвенно-пирокластического чехла острова Симушир. *Вестник Москов. ун-та, Серия 4, Геология*, 6: 35–45. = Shcherbakov V.D., Nekrylov N.A., Savostin G.G., Popov D.V., Dirksen O.V. 2018. The composition of melt inclusions in phenocrysts in tephra of the Simushir Island, Central Kuriles. *Moscow University Geology Bull.*, 73(1): 31–42. <https://doi.org/10.3103/s014587521801009x>

*Статья с англоязычными метаданными, приведенными в источнике*

9. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Смирнов С.З., Мартынов Ю.А., Дегтерев А.В. **2018**. Петрохимические особенности вулканических комплексов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова) = Rybin A.V., Chibisova M.V., Smirnov S.Z., Martynov Yu.A., Degterev A.V. Petrochemical features of volcanic complexes of Medvezh'ya caldera (Iturup Island, Kuril Islands). *Геосистемы переходных зон = Geosystems of Transition Zones*, 2(4): 377–385. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.377-385> (In Russ, abstract in Eng).

*Статья в сборнике статей или материалов конференции, глава в монографии*

10. Grebennikova T.A. **2011**. Diatom flora of lakes, ponds and streams of Kuril Diatoms. In: *Diatoms: Ecology and Life Cycle*. New York, Nova Publ., 93–124.
11. Сим Л.А., Богомоллов Л.М., Брянцева Г.В. **2016**. О возможной границе между Амурской и Охотской микроплитами на Сахалине. В кн.: *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы 4-й Тектонофиз. конф., 3–7 окт. 2016, Москва*. М.: ИФЗ РАН, 1: 256–263.
12. Hinrichs K.U., Boetius A. **2002**. The anaerobic oxidation of methane: new insights in microbial ecology and biogeochemistry. In: Wefer G., Billett D., Hebbeln D. et al. (eds). *Ocean Margin Systems*. Berlin, Heidelberg, Springer, 457–477.

*Патент*

13. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В., Фирстов П.П. **2014**. *Сигнализатор изменений главных компонент: пат. RU 141416*. № 2013147112; заявл. 22.10.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.

*Интернет-ресурс*

14. Кондратьев В.Б. **2011**. *Глобальная фармацевтическая промышленность = The global pharmaceutical industry*. URL: <http://perspektivy.info/rus/ekob/2011-07-18.html> (дата обращения: 23.06.2013).
15. *NGDC: Tsunami Data and Information*. URL: [https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\\_db.shtml](https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml) (accessed: 29.09.2019).

## Тематический указатель публикаций в журнале в 2019 г. (том 3)

Автор(ы). Название	Выпуск	Страницы
<b>Геотектоника и геодинамика. Структурная геология</b>		
Сафонов Д.А. Пространственное распределение тектонических напряжений в южной глубокой части Курило-Камчатской зоны субдукции doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.175-188	2	175–188
Полец А.Ю. Поле современных тектонических напряжений Сахалинско-Японского сейсмического пояса doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.189-200	2	189–200
Борняков С.А., Салко Д.В., Шагун А.Н., Добрынина А.А., Усынин Л.А. Медленные деформационные волны как возможный предвестник сейсмической опасности doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.267-276	3	267–276
Булгаков Р.Ф., Сеначин В.Н. Морские террасы и влияние эффекта гидроизостазии на вертикальные движения Сахалина doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286	3	277–286
Каменев П.А., Заболотин А.Е., Дегтярев В.А., Жердева О.А. Разработка геомеханической модели активного разлома южного Сахалина doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.287-295	3	287–295
Thanh Phi Truong, Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С. Характеристики фаз тектонической активности вдоль зоны разлома Цхао Банг – Ти Иен, разрез Ти Иен – Ланг Сон, северо-восточная часть, Вьетнам doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.345-363	4	345–363
<b>Геофизика, геофизические методы поиска полезных ископаемых. Сейсмология</b>		
Приглашение к дискуссии. Л.М. Богомолов doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.003-004	1	3–4
Паровышный В.А., Сохатюк Ю.В., Паровышный Д.В., Веселов О.В., Е.В. Кочергин. О подходах к решению некоторых проблем оперативного прогноза сейсмических событий doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.005-018	1	5–18
Свердлик Л.Г., Имашев С.А. О предсейсмических аномалиях температуры атмосферы doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.019-026	1	19–26
Закупин А.С., Богинская Н.В. Современная сейсмичность в районе Центрально-Сахалинского разлома (юг о. Сахалин): ложная тревога или отодвинутый прогноз? doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.027-034	1	27–34
Сычев В.Н., Сычева Н.А., Имашев С.А. Исследование афтершоковой последовательности Суусамырского землетрясения doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.035-043	1	35–43
Жигулев В.В., Савицкий А.В., А.В. Жигулев А.В. Изучение газогидратов Берингова моря с применением АВО-анализа doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.044-053	1	44–53
Костина А.А., Желнин М.С., Плехов О.А., Пантелеев И.А. Исследование эффективности применения аналитических подходов для описания эволюции паровой камеры при добыче нефти методом парогравитационного дренирования doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.054-064	1	54–64
Сафонов Д.А., Фокина Т.А., Коваленко Н.С. Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2018 году doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.364-376	4	364–376
Закупин А.С., Богинская Н.В., Андреева М.Ю. Методические аспекты исследования сейсмических последовательностей методом СРП (саморазвивающиеся процессы) на примере Невельского землетрясения на Сахалине doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389	4	377–389
Каменев П.А., Костылев Д.В., Богинская Н.В., Закупин А.С. Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.390-402	4	390–402
<b>Океанология</b>		
Шакиров Р.Б., Обжиров А.И., Шакирова М.В., Мальцева Е.В. О газогидратах окраинных морей северо-западной части Тихого океана: закономерности генезиса и распространения (обзор) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.065-106	1	65–106
Шакиров Р.Б., Мишукова О.В. Пространственное распределение потоков метана на границе вода–атмосфера в Охотском море doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.107-123	1	107–123
Шевченко Г.В., Хузеева М.О., Ячменев В.Е., Шишкин А.А. Штормовое волнение на южных Курильских островах по визуальным и инструментальным данным doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.124-136	1	124–136
Борисов А.С., Ковалев Д.П., Костылев Д.В., Левин Ю.Н. Микросейсмы на севере острова Сахалин, обусловленные морским волнением doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.201-208	2	201–208
Горбунов А.О., Ковалев Д.П., Ковалев П.Д. Донные наносы, переносимые течением в районе размыва берега залива Мордвинова (о. Сахалин) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.209-218	2	209–218
Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Хузеева М.О. Особенности морского волнения у юго-восточного побережья Сахалина при перемещении циклонов над районом наблюдений doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.296-303	3	296–303

Кайстренко В.М. Особенности использования данных о палеоцунами для оценок цунамиопасности doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.403-416	4	403–416
Кайстренко В.М., Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Горбунов А.О., Нисимура Ю. Проявления цунами 1 августа 1940 г. в Каменке, Приморье (новые данные о давнем историческом цунами) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.417-422	4	417–422
<b>Геоморфология и эволюционная география</b>		
Афанасьев В.В., Леонтьев И.О., Уба А.В. Анализ динамики лагунной аккумулятивной барьерной формы (о. Сахалин) на основе математического моделирования и карт деформаций рельефа за многолетний период doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.137-143	1	137–143
Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Кайстренко В.М., Харламов А.А., Арсланов Х.А., Максимов Ф.Е. Использование палеоданных для оценки цунамиопасности побережья бухты Малокурильская (остров Шикотан) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.219-236	2	219–236
Дунаев Н.Н., Репкина Т.Ю., Баранская А.В., Афанасьев В.В. Современная динамика аккумулятивного берега, сложенного пирокластикой подводного вулканического извержения doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.237-244	2	237–244
Козлов Д.Н., Коротеев И.Г. Современные данные о морфологии затопленной кальдеры Львиная Пасть (о. Итуруп, Южные Курильские острова) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.245-248	2	245–248
Афанасьев В.В., Уба А.В., Левицкий А.И. Миграция проливов и морское осадконакопление в лагунах doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.310-317	3	310–317
Афанасьев В.В. О новом типе эолового морфогенеза на вулканогенных берегах (о. Итуруп, Большая Курильская гряда) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.423-427	4	423–427
<b>Петрология. Вулканология</b>		
Чибисова М.В., Дегтерев А.В. Активность вулкана Пик Сарычева (о. Матуа, Средние Курилы) в 2017–2018 гг.: по спутниковым и визуальным данным doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.144-148	1	144–148
Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Извержение вулкана Райкоке в июне 2019 г. (о. Райкоке, Центральные Курильские острова) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.304-309	3	304–309
<b>Геоэкология</b>		
Жарков Р.В. Физико-химические свойства термальных вод Лунских источников (остров Сахалин) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.249-255	2	249–255
Ежкин А.К. Лишайники древесных субстратов в местах проявления сольфатарной активности на Южных Курильских островах doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.256-263	2	256–263
Жарков Р.В. Физико-химические свойства и перспективы использования сапропелевых грязей озера Большое Чибисанское (остров Сахалин) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.318-324	3	318–324
Никитенко О.А., Еришов В.В. Физико-химические свойства природных вод в районе городской свалки твердых бытовых отходов (Южно-Сахалинск) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.325-332	3	325–332
Р.В. Жарков, Д.Н. Козлов, В.В. Еришов, Н.С. Сырбу, О.А. Никитенко, Г.В. Устюгов. Паромайские термальные источники острова Сахалин: современное состояние и перспективы использования doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.428-437	4	428–437
Р.В. Жарков, Д.Н. Козлов, Б.И. Челнокова. Физические и химические особенности сапропелевых грязей некоторых пресноводных озер Елизовского района Камчатского края (Россия) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.438-447	4	438–447
<b>Механика деформируемого твердого тела</b>		
Мубассарова В.А., Богомолов Л.М., Закупин А.С., Пантелеев И.А. Вариации акустической эмиссии и деформации горных пород при триггерных воздействиях электромагнитных полей (обзор). Часть 1 doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.155-174	2	155–174
<b>Конференции, экспедиции</b>		
III Всероссийская научная конференция с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы»	2	264
III Всероссийская научная конференция с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы»	3	333–341
<b>Книги</b>		
Иван Николаевич Тихонов. Вопросы сейсмологии: Избранные труды	3	342
<b>От редколлегии</b>		
Правила оформления и публикации рукописей в журнале «Геосистемы переходных зон»	4	448–453
Тематический указатель публикаций в журнале в 2019 г. (том 3)	4	454–457
Авторский указатель публикаций в журнале в 2019 г. (том 3)	4	458–460

## Topical index of articles published in the Journal in 2019 (volum 3)

Author(s). Title	Issue	Pages
<b>Geotectonics and geodynamics. Structural geology</b>		
<i>Safonov D.A.</i> Spatial distribution of tectonic stress in the southern deep part of the Kuril-Kamchatka subduction zone doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.175-188	2	175–188
<i>Polets A.Yu.</i> Modern tectonic stress field of the Sakhalin-Japanese earthquake belt doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.189-200	2	189–200
<i>Borniyakov S.A., Salko D.V., Shagun A.N., Dobrynina A.A., Usynin L.A.</i> The slow deformation waves as a possible precursor of seismic hazard doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.267-276	3	267–276
<i>Bulgakov R.F., Senachin V.N.</i> Marine terraces and hydroisostasy influence on the vertical movements of the Sakhalin doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.277-286	3	277–286
<i>Kamenev P.A., Zabolotin A.E., Degtyarev V.A., Zherdeva O.A.</i> Geomechanical model of South Sakhalin active fault doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.287-295	3	287–295
<i>Truong Thanh Phi, Shakirov R.B., Syrbu N.S.</i> Characteristics of tectonic activity phases along The Cao Bang-Tien Yen fault zone, Tien Yen-Lang Son section, Northeastern part, Vietnam doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.345-363	4	345–363
<b>Geophysics, geophysics methods of the mineral prospecting. Seismology</b>		
<i>Request for discussion unu Invitation to the discussion. Bogomolov L.M.</i> doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.003-004	1	3–4
<i>Parovyshny V.A., Sohatyuk Yu.V., Parovyshny D.V., Veselov O.V., Kochergin E.V.</i> Approach to solve specific problems of operative predictions of seismic events doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.005-018	1	5–18
<i>Sverdlik L.G., Imashev S.A.</i> On preseismic anomalies of atmosphere temperature doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.019-026	1	19–26
<i>Zakupin A.S., Boginskaya N.V.</i> Study of seismicity in the area of the Central Sakhalin fault in the South of Sakhalin Island doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.027-034	1	27–34
<i>Sychev V.N., Sycheva N.A., Imashev S.A.</i> Study of aftershock sequence of Suusamyр earthquake doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.035-043	1	35–43
<i>Zhigulev V.V., Savitsky A.V., Zhigulev A.V.</i> Study of Bering Sea gas hydrates with application of AVO-analysis doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.044-053	1	44–53
<i>Kostina A.A., Zhelnin M.S., Plekhov O.A., Panteleev I.A.</i> Investigation on effectiveness of analytical models to describe steam chamber growth during steam-assisted gravity drainage doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.054-064	1	54–64
<i>Safonov D.A., Fokina T.A., Kovalenko N.S.</i> Seismicity of the South Far East of Russia in 2018 doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.364-376	4	364–376
<i>Zakupin A.S., Boginskaya N.V., Andreeva M.Yu.</i> Methodological aspects of the study of seismic sequences by SDP (self-developing processes) on the example of the Nevel'sk earthquake on Sakhalin doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389	4	377–389
<i>Kamenev P.A., Kostylev D.V., Boginskaya N.V., Zakupin A.S.</i> Geophysical surveys in the southern part of the Central Sakhalin Fault based on new integrated network doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.390-402	4	390–402
<b>Oceanology</b>		
<i>Shakirov R.B., Obzhurov A.I., Shakirova M.V., Maltseva E.V.</i> On gas hydrates of East Asian marginal seas: patterns of genesis and distribution (review) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.065-106	1	65–106
<i>Shakirov R.B., Mishukova O.V.</i> The spatial distribution of the methane fluxes on the water–atmosphere boundary in the Sea of Okhotsk doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.107-123	1	107–123
<i>Shevchenko G.V., Khuzeeva M.O., Yachmenev V.E., Shishkin A.A.</i> Storm waves in the South Kuril Island by visual and instrumental data doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.124-136	1	124–136
<i>Borisov A.S., Kovalev D.P., Kostylev D.V., Levin Yu.N.</i> Microseisms on the North of Sakhalin Island caused by sea waves doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.201-208	2	201–208
<i>Gorbunov A.O., Kovalev D.P., Kovalev P.D.</i> The sediment transported by the flow in the eroding area of the Mordvinov Gulf coast (Sakhalin Island) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.209-218	2	209–218
<i>Kovalev D.P., Kovalev P.D., Khuzeeva M.O.</i> Peculiarities of sea waves near the southeastern coast of Sakhalin Island at passing cyclones above the observation area doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.296-303	3	296–303

<i>Kaistrenko V.M.</i> Peculiarity of using the paleotsunami data for the tsunami hazard estimation doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.403-416	4	403–416
<i>Kaistrenko V.M., Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Gorbunov A.O., Nishimura Yu.</i> The manifestation of tsunami of August 1, 1940 in the Kamenka settlement, Primorye (new data concerning the old tsunami) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.417-422	4	417–422
<b>Geomorphology and evolution geography</b>		
<i>Afanas'yev V.V., Leont'yev I.O., Uba A.V.</i> Analysis of the dynamics of the lagoon accumulative barrier form (Sakhalin Island) on the basis of mathematical modeling and relief strain maps for a long-term period doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.137-143	1	137–143
<i>Razhigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Kaistrenko V.M., Kharlamov A.A., Arslanov Kh.A., Maksimov F.E.</i> Application of paleodata for evaluation of the tsunami hazard of the Malokurilskaya bay coast (Shikotan Island) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.219-236	2	219–236
<i>Dunaev N.N., Repkina T.Yu., Baranskaya A.V., Afanasiev V.V.</i> Modern dynamics of an accumulative coast composed by pyroclastics of an underwater volcanic eruption doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.237-244	2	237–244
<i>Kozlov D.N., Koroteev I.G.</i> Modern data on morphology of the flooded caldera Lvinaya Past (Iturup Island, Southern Kuriles) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.245-248	2	245–248
<i>Afanas'yev V.V., Uba A.V., Levitsky A.I.</i> Migration of the straits and pelagic sedimentation in the lagoons doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.310-317	3	310–317
<i>Afanas'yev V.V.</i> A new type of aeolian morphogenesis on volcanic shores (Iturup Island, Great Kuril Ridge) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.423-428	4	423–428
<b>Petrology. Volcanology</b>		
<i>Chibisova M.V., Degterev A.V.</i> The activity of Sarychev Peak volcano (Matua Island, Middle Kuriles) in 2017– 2018: on the basis satellite and visual data doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.1.144-148	1	144–148
<i>Degterev A.V., Chibisova M.V.</i> The eruption of Raikoke volcano in June of 2019 (Rakoke Island, Central Kuril Islands) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.304-309	3	304–309
<b>Geoecology</b>		
<i>Zharkov R.V.</i> Physical and chemical properties of thermal waters of the Lunsky springs (Sakhalin Island) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.249-255	2	249–255
<i>Ezhkin A.K.</i> Lichens of wood substrates in areas of solfataric activity on Southern Kuriles doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.256-263	2	256–263
<i>Zharkov R.V.</i> Physical and chemical properties and prospects of use of sapropelic mud of the Bolshoe Chibisanskoe Lake (Sakhalin Island) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.318-324	3	318–324
<i>Nikitenko O.A., Ershov V.V.</i> Physical-chemical properties of natural waters in the area municipal solid waste landfill (Yuzhno-Sakhalinsk) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.325-332	3	325–332
<i>Zharkov R.V., Kozlov D.N., Ershov V.V., Syrbu N.S., Nikitenko O.A., Ustyugov G.V.</i> Paromay thermal springs of Sakhalin Island: modern state and prospects for use doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.428-437	4	428–437
<i>Zharkov R.V., Kozlov D.N., Chelnokova B.I.</i> Physical and chemical features of some freshwater lakes in the Elizovo district of the Kamchatka (Russia) doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.438-447	4	438–447
<b>Mechanics of deformable solids</b>		
<i>Mubassarova V.A., Bogomolov L.M., Zakupin A.S., Panteleev I.A.</i> Acoustic emission and strain responses of rocks triggered by electromagnetic action (A review). Part 1 doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.2.155-174	2	155–174
<b>Conference, expeditions</b>		
III Russian scientific conference with foreign participants “Geodynamical Processes and Natural Hazards” (Yuzhno-Sakhalinsk, 2019)	2	264
III Russian scientific conference with foreign participants “Geodynamical Processes and Natural Hazards” (Yuzhno-Sakhalinsk, 2019)	3	333–341
<b>Books</b>		
Ivan Nikolaevich Tikhonov. Problems of seismology: Selected works	3	342
<b>Editorial Note</b>		
The rules for the authors of the journal “Geosystems of Transition Zones”	4	448–453
Topical index of articles published in the Journal in 2019 (volum 3)	4	454–457
Author Index of Journal Publications in 2019 (volum 3)	4	458–460

## Авторский указатель публикаций в журнале в 2019 г. (том 3)

Автор(ы). Название	Выпуск	Страницы
<i>Андреева М.Ю.</i> См. Закупин А.С.	4	
<i>Арсланов Х.А.</i> См. Разжигаева Н.Г.	2	
<i>АФАНАСЬЕВ В.В.</i> О новом типе эолового морфогенеза на вулканогенных берегах (о. Итуруп, Большая Курильская гряда)	4	423–427
<i>Афанасьев В.В.</i> См. Дунаев Н.Н.	2	
<i>АФАНАСЬЕВ В.В., ЛЕОНТЬЕВ И.О., УБА А.В.</i> Анализ динамики лагунной аккумулятивной барьерной формы (о. Сахалин) на основе математического моделирования и карт деформаций рельефа за многолетний период	1	137–143
<i>АФАНАСЬЕВ В.В., УБА А.В., ЛЕВИЦКИЙ А.И.</i> Миграция проливов и морское осадконакопление в лагунах	3	310–317
<i>Баранская А.В.</i> См. Дунаев Н.Н.	2	
<i>Богинская Н.В.</i> См. Закупин А.С., Богинская Н.В. <i>Она же.</i> См. Закупин А.С., Богинская Н.В., Андреева М.Ю. <i>Она же.</i> См. Каменев П.А.	1, 4	
<i>БОГОМОЛОВ Л.М.</i> Приглашение к дискуссии	1	3–4
<i>Богомоллов Л.М.</i> См. Мубассарова В.А.	2	
<i>БОРИСОВ А.С., КОВАЛЕВ Д.П., КОСТЫЛЕВ Д.В., ЛЕВИН Ю.Н.</i> Микросейсмы на севере острова Сахалин, обусловленные морским волнением	2	201–208
<i>БОРНЯКОВ С.А., САЛКО Д.В., ШАГУН А.Н., ДОБРЫНИНА А.А., УСЫНИН Л.А.</i> Медленные деформационные волны как возможный предвестник сейсмической опасности	3	267–276
<i>БУЛГАКОВ Р.Ф., СЕНАЧИН В.Н.</i> Морские террасы и влияние эффекта гидроизостазии на вертикальные движения Сахалина	3	277–286
<i>Веселов О.В.</i> См. Паровышний В.А.	1	
<i>Ганзей Л.А.</i> См. Кайстренко В.М. <i>Она же.</i> См. Разжигаева Н.Г.	2, 4	
<i>ГОРБУНОВ А.О., КОВАЛЕВ Д.П., КОВАЛЕВ П.Д.</i> Донные наносы, переносимые течением в районе размыва берега залива Мордвинова (о. Сахалин)	2	209–218
<i>Горбунов А.О.</i> См. Кайстренко В.М.	4	
<i>Гребенникова Т.А.</i> См. Разжигаева Н.Г.	2	
<i>ДЕГТЕРЕВ А.В., ЧИБИСОВА М.В.</i> Извержение вулкана Райкоке в июне 2019 г. (о. Райкоке, Центральные Курильские острова)	3	304–309
<i>Дегтерев А.В.</i> См. Чибисова М.В.	1	
<i>Дегтярев В.А.</i> См. Каменев П.А.	3	
<i>Добрынина А.А.</i> См. Борняков С.А.	3	
<i>ДУНАЕВ Н.Н., РЕПКИНА Т.Ю., БАРАНСКАЯ А.В., АФАНАСЬЕВ В.В.</i> Современная динамика аккумулятивного берега, сложенного пирокластикой подводного вулканического извержения	2	237–244
<i>ЕЖКИН А.К.</i> Лишайники древесных субстратов в местах проявления сольфатарной активности на Южных Курильских островах	2	256–263
<i>Ершов В.В.</i> См. Жарков Р.В. <i>Он же.</i> См. Никитенко О.А.	3, 4	
<i>ЖАРКОВ Р.В.</i> Физико-химические свойства и перспективы использования сапропелевых грязей озера Большое Чибисанское (остров Сахалин)	3	318–324
<i>ЖАРКОВ Р.В.</i> Физико-химические свойства термальных вод Лунских источников (остров Сахалин)	2	249–255
<i>ЖАРКОВ Р.В., КОЗЛОВ Д.Н., ЕРШОВ В.В., СЫРБУ Н.С., НИКИТЕНКО О.А., УСТЮГОВ Г.В.</i> Паромайские термальные источники острова Сахалин: современное состояние и перспективы использования	4	428–437
<i>ЖАРКОВ Р.В., КОЗЛОВ Д.Н., ЧЕЛНОКОВА Б.И.</i> Физические и химические особенности сапропелевых грязей некоторых пресноводных озер Елизовского района Камчатского края (Россия)	4	438–447
<i>Желнин М.С.</i> См. Костина А.А.	1	
<i>Жердева О.А.</i> См. Каменев П.А.	3	
<i>Жигулев А.В.</i> См. Жигулев В.В.	1	
<i>ЖИГУЛЕВ В.В., САВИЦКИЙ А.В., ЖИГУЛЕВ А.В.</i> Изучение газогидратов Берингова моря с применением АVO-анализа	1	44–53
<i>Заболотин А.Е.</i> См. Каменев П.А.	3	
<i>ЗАКУПИН А.С., БОГИНСКАЯ Н.В.</i> Современная сейсмичность в районе Центрально-Сахалинского разлома (юг о. Сахалин): ложная тревога или отодвинутый прогноз?	1	27–34

ЗАКУПИН А.С., БОГИНСКАЯ Н.В., АНДРЕЕВА М.Ю. Методические аспекты исследования сейсмических последовательностей методом СРП (саморазвивающиеся процессы) на примере Невельского землетрясения на Сахалине	4	377–389
Закупин А.С. См. Каменев П.А. <i>Он же</i> . См. Мубассарова В.А.	2, 4	
Имашев С.А. См. Свердлик Л.Г. <i>Он же</i> . См. Сычев В.Н.	1	
КАЙСТРЕНКО В.М. Особенности использования данных о палеоцунами для оценок цунамиопасности	4	403–416
КАЙСТРЕНКО В.М., РАЗЖИГАЕВА Н.Г., ГАНЗЕЙ Л.А., ГОРБУНОВ А.О., НИСИМУРА Ю. Проявления цунами 1 августа 1940 г. в Каменке, Приморье (новые данные о давнем историческом цунами)	4	417–422
Кайстренко В.М. См. Разжигаетва Н.Г.	2	
КАМЕНЕВ П.А., ЗАБОЛОТИН А.Е., ДЕГТЯРЕВ В.А., ЖЕРДЕВА О.А. Разработка геомеханической модели активного разлома южного Сахалина	3	287–295
КАМЕНЕВ П.А., КОСТЫЛЕВ Д.В., БОГИНСКАЯ Н.В., ЗАКУПИН А.С. Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования	4	390–402
КОВАЛЕВ Д.П., КОВАЛЕВ П.Д., ХУЗЕЕВА М.О. Особенности морского волнения у юго-восточного побережья Сахалина при перемещении циклонов над районом наблюдений	3	296–303
Ковалев Д.П. См. Борисов А.С. <i>Он же</i> . См. Горбунов А.О.	2	
Ковалев П.Д. См. Горбунов А.О. <i>Он же</i> . См. Ковалев Д.П.	2	
Коваленко Н.С. См. Сафонов Д.А.	4	
КОЗЛОВ Д.Н., КОРОТЕЕВ И.Г. Современные данные о морфологии затопленной кальдеры Львиная Пасть (о. Итуруп, Южные Курильские острова)	2	245–248
Козлов Д.Н. См. Жарков Р.В., Козлов Д.Н. и др. <i>Он же</i> . См. Жарков Р.В., Козлов Д.Н., Челнокова Б.И.	4	
Коротеев И.Г. См. Козлов Д.Н.	2	
КОСТИНА А.А., ЖЕЛНИН М.С., ПЛЕХОВ О.А., ПАНТЕЛЕЕВ И.А. Исследование эффективности применения аналитических подходов для описания эволюции паровой камеры при добыче нефти методом парогравитационного дренирования	1	54–64
Костылев Д.В. См. Борисов А.С. <i>Он же</i> . См. Каменев П.А.	2, 4	
Кочергин Е.В. См. Паровышний В.А.	1	
Левин Ю.Н. См. Борисов А.С.	2	
Левицкий А.И. См. Афанасьев В.В.	3	
Леонтьев И.О. См. Афанасьев В.В.	1	
Максимов Ф.Е. См. Разжигаетва Н.Г.	2	
Мальцева Е.В. См. Шакиров Р.Б.	1	
Мишукова О.В. См. Шакиров Р.Б.	1	
МУБАССАРОВА В.А., БОГОМОЛОВ Л.М., ЗАКУПИН А.С., ПАНТЕЛЕЕВ И.А. Вариации акустической эмиссии и деформации горных пород при триггерных воздействиях электромагнитных полей (обзор). Часть 1	2	155–174
НИКИТЕНКО О.А., ЕРШОВ В.В. Физико-химические свойства природных вод в районе городской свалки твердых бытовых отходов (Южно-Сахалинск)	3	325–332
Никитенко О.А. См. Жарков Р.В.	4	
Нисимура Ю. См. Кайстренко В.М.	4	
Обжиров А.И. См. Шакиров Р.Б.	1	
Пантелеев И.А. См. Костина А.А. <i>Он же</i> . См. Мубассарова В.А.	1	
ПАРОВЫШНИЙ В.А., СОХАТЮК Ю.В., ПАРОВЫШНИЙ Д.В., ВЕСЕЛОВ О.В., КОЧЕРГИН Е.В. О подходах к решению некоторых проблем оперативного прогноза сейсмических событий	1	5–18
Паровышний Д.В. См. Паровышний В.А.	1	
Плехов О.А. См. Костина А.А.	1	
ПОЛЕЦ А.Ю. Поле современных тектонических напряжений Сахалинско-Японского сейсмического пояса	2	189–200
РАЗЖИГАЕВА Н.Г., ГАНЗЕЙ Л.А., ГРЕБЕННИКОВА Т.А., КАЙСТРЕНКО В.М., ХАРЛАМОВ А.А., АРСЛАНОВ Х.А., МАКСИМОВ Ф.Е. Использование палеоданных для оценки цунамиопасности побережья бухты Малокурильская (остров Шикотан)	2	219–236
Разжигаетва Н.Г. См. Кайстренко В.М.	4	
Репкина Т.Ю. См. Дунаев Н.Н.	2	
Савицкий А.В. См. Жигулев В.В.	1	
Салко Д.В. См. Борняков С.А.	3	

<i>САФОНОВ Д.А.</i> Пространственное распределение тектонических напряжений в южной глубокой части Курило-Камчатской зоны субдукции	2	175–188
<i>САФОНОВ Д.А., ФОКИНА Т.А., КОВАЛЕНКО Н.С.</i> Сейсмичность юга Дальнего Востока России в 2018 году	4	364–376
<i>СВЕРДЛИК Л.Г., ИМАШЕВ С.А.</i> О предсейсмических аномалиях температуры атмосферы	1	19–26
<i>Сеначин В.Н.</i> См. Булгаков Р.Ф.	3	
<i>Сохатюк Ю.В.</i> См. Паровышний В.А.	1	
<i>Сырбу Н.С.</i> См. Жарков Р.В. <i>Она же.</i> См. Чон Тхань Фи	4	
<i>СЫЧЕВ В.Н., СЫЧЕВА Н.А., ИМАШЕВ С.А.</i> Исследование афтершоковой последовательности Суусамырского землетрясения	1	35–43
<i>Сычева Н.А.</i> См. Сычев В.Н.	1	
<i>Уба А.В.</i> См. Афанасьев В.В., Леонтьев И.О., Уба А.В. <i>Он же.</i> См. Афанасьев В.В., Уба А.В., Левицкий А.И.	1, 3	
<i>Устюгов Г.В.</i> См. Жарков Р.В.	4	
<i>Усьнин Л.А.</i> См. Борняков С.А.	3	
<i>Фокина Т.А.</i> См. Сафонов Д.А.	4	
<i>Харламов А.А.</i> См. Разжигасва Н.Г.	2	
<i>Хузеева М.О.</i> См. Ковалев Д.П. <i>Она же.</i> См. Шевченко Г.В.	1, 3	
<i>Челнокова Б.И.</i> См. Жарков Р.В.	4	
<i>ЧИБИСОВА М.В., ДЕГТЕРЕВ А.В.</i> Активность вулкана Пик Сарычева (о. Матуа, Средние Курилы) в 2017–2018 гг.: по спутниковым и визуальным данным	1	144–148
<i>Чибисова М.В.</i> См. Дегтерев А.В.	3	
<i>ЧОН ТХАНЬ ФИ, ШАКИРОВ Р.Б., СЫРБУ Н.С.</i> Характеристики фаз тектонической активности вдоль зоны разлома Цхао Банг – Ти Иен, разрез Ти Иен – Ланг Сон, северо-восточная часть, Вьетнам	4	345–363
<i>Шагун А.Н.</i> См. Борняков С.А.	3	
<i>ШАКИРОВ Р.Б., МИШУКОВА О.В.</i> Пространственное распределение потоков метана на границе вода–атмосфера в Охотском море	1	107–123
<i>ШАКИРОВ Р.Б., ОБЖИРОВ А.И., ШАКИРОВА М.В., МАЛЬЦЕВА Е.В.</i> О газогидратах окраинных морей северо-западной части Тихого океана: закономерности генезиса и распространения (обзор)	1	65–106
<i>Шакиров Р.Б.</i> См. Чон Тхань Фи	4	
<i>Шакирова М.В.</i> См. Шакиров Р.Б.	1	
<i>ШЕВЧЕНКО Г.В., ХУЗЕЕВА М.О., ЯЧМЕНЕВ В.Е., ШИШКИН А.А.</i> Штормовое волнение на южных Курильских островах по визуальным и инструментальным данным	1	124–136
<i>Шишкин А.А.</i> См. Шевченко Г.В.	1	
<i>Ячменев В.Е.</i> См. Шевченко Г.В.	1	