



SEISMIC MONITORING OF THE COAL MINING AREA ON SAKHALIN ISLAND USING TEMPORARY NETWORKS OF THE FRS GS RAS

D.V. Kostylev ^{1,2}✉, N.V. Boginskaya ²

¹ Sakhalin Branch of the Federal Research Center of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 2A Tikhookenskaya St, Yuzhno-Sakhalinsk 693010, Russia

² Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1B Nauki St, Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia

ABSTRACT. In April – May 2021, in the Khabarovsk Territory and Sakhalin Region in the Far East Federal District of the Russian Federation, the Federal Research Center "Geophysical Survey RAS" deployed temporary networks as a part of Large-Scale Research Facilities – continuous seismic monitoring of the Russian Federation, adjacent areas and the world. The deployment of new stations provided a reliable integration of real-time seismic data into a centralized monitoring system for the Sakhalin Region.

The seismic study has been performed in the Ulegorsk District, Sakhalin Region, where the Solntsevsky brown coal deposit – the most potential on the island – is located. There were presented the data on seismic events of different origin recorded since the stations had been brought into service. Emphasis has been placed on considerable improvements in epicenter location accuracy and enhancing possibilities of determining earthquakes and industrial explosions. There are shown the results of monitoring for earthquake mechanism studies. The monitoring system that is currently available allows recording the representative earthquake events with $ML \geq 0.5$ in the immediate vicinity of coal mines, thus providing the possibility of improving control of blasting work and of weak and potential induced seismicity caused by multiple anthropogenic impacts on subsoil.

KEYWORDS: Large-Scale Research Facilities; earthquake; anthropogenic impact; earthquake focal mechanism; coal deposit

FUNDING: The work was conducted with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (as part of state assignment 075-00576-21) and with the use of the data acquired via Large-Scale Research Facilities "Seismic and infrasonic monitoring of the Arctic cryolite zone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, adjacent areas and the world".

SHORT COMMUNICATION

Received: December 8, 2021

Revised: February 3, 2022

Accepted: February 16, 2022

Correspondence: Dmitry V. Kostylev, d.kostylev@imgg.ru

FOR CITATION: Kostylev D.V., Boginskaya N.V., 2022. Seismic Monitoring of the Coal Mining Area on Sakhalin Island Using Temporary Networks of the FRS GS RAS. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2s), 0634. doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0634

СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ РАЙОНА УГЛЕДОБЫЧИ НА о. САХАЛИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВРЕМЕННЫХ СЕТЕЙ ФИЦ ЕГС РАН

Д.В. Костылев^{1,2}, Н.В. Богинская²

¹ Сахалинский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 693010, Южно-Сахалинск, ул. Тихоокеанская, 2А, Россия

² Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, Россия

АННОТАЦИЯ. В апреле – мае 2021 г. на Дальнем Востоке РФ Федеральным исследовательским центром «Единая геофизическая служба РАН» были развернуты временные сети в Хабаровском крае и Сахалинской области как часть уникальной научной установки – комплекса непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира. Установка новых станций надежно обеспечила интеграцию данных, поступающих с пунктов в режиме реального времени, в единую систему сейсмического мониторинга в Сахалинской области.

Проведено исследование сейсмичности в Углегорском районе Сахалинской области, на территории которого расположено Солнцевское бурогольное месторождение, являющееся самым перспективным на острове. Приведены результаты регистрации сейсмических событий различного происхождения с момента ввода станций в эксплуатацию. Отмечено значительное повышение точности определяемых эпицентров и возможностей детерминирования землетрясений и промышленных взрывов. Показаны результаты работы системы мониторинга для исследования механизмов землетрясений. Созданная система мониторинга позволяет вести представительную регистрацию сейсмических событий с $M_L \geq 0.5$ в непосредственной близости от угольных разрезов, что дает возможность с повышенной точностью контролировать проводимые взрывные работы, а также слабую и возможную наведенную сейсмичность, сформировавшуюся вследствие постоянного техногенного воздействия на недра.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: уникальная научная установка; землетрясение; техногенное воздействие; механизм очага землетрясения; угольное месторождение

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфраструктурный комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

1. ВВЕДЕНИЕ

Во многих исследованиях [Adushkin, Turuntaev, 2015; Emanov et al., 2014] доказано существование наведенной сейсмичности вблизи горнодобывающих предприятий. Произошедшее на Сахалине 13 сентября 2020 г. Углегорское землетрясение с $M_w=4.8$ и последовавшие за ним афтершоки локализованы в районе активной добычи угля на Солнцевском угольном разрезе, что не исключает связи сейсмического процесса с техногенной сейсмичностью [Semenova et al., 2020]. В настоящее время крупнейшим угледобывающим предприятием Сахалинской области, осуществляющим полный цикл по добыче и отгрузке твердого топлива, является ООО «Восточная горнорудная компания» (ВГК) с входящим в нее ООО «Солнцевский угольный разрез» (<https://www.eastmining.ru/o-kompanii/>). Кроме того, в районе исследования в настоящее время идет строительство крупнейшего в России угольного конвейера протяженностью 23 км, что оказывает дополнительное влияние на сейсмический режим и требует контроля сейсмичности. В связи с указанным выше землетрясением, а также установленным изменением режима сейсмичности района Солнцевского угольного разреза [Kostylev et al., 2022], в соответствии с решением

Сахалинского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, был разработан проект системы мониторинга Солнцевского угольного разреза. Данный проект учитывает опыт и наработки Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН (ФИЦ ЕГС РАН), использованные, в частности, в создании уникальной научной установки (УНУ), предназначенной для непрерывного наблюдения за сейсмическими процессами. Одной из главных задач УНУ является разработка и создание новых методов анализа и обработки больших объемов сейсмологической и геофизической информации, в том числе и в режиме реального времени, для надежной и оперативной оценки параметров землетрясений, мониторинга состояния различных природных и технических объектов. Авторы объединили возможности частей данной установки для осуществления более детального мониторинга Солнцевского угольного разреза.

2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА

Центром создаваемой сети сейсмического мониторинга района Солнцевского угольного месторождения стала сейсмическая станция Сахалинского филиала

ФИЦ ЕГС РАН «Углегорск», расположенная в непосредственной близости от территории Солнцевского угольного разреза (рис. 1, б). Развитие сети было начато в 2021 г. и предусматривало два этапа. На первом этапе была выполнена установка дополнительных автономных станций в населенных пунктах района с передачей информации в режиме реального времени. Для организации сети в феврале 2021 г. авторами были проведены рекогносцировочные работы в населенных пунктах района (измерения уровня сейсмического шума, обеспечение электропитания и систем связи, решение вопросов сохранности оборудования) и исходя из полученных данных были выбраны два пункта для размещения дополнительных станций, монтаж и ввод в эксплуатацию которых состоялся в конце апреля 2021 г. Второй этап предусматривает установку дополнительных автоматических пунктов, оснащенных короткопериодными сейсмометрами, и планируется к реализации в 2022 г.

Для созданной сети мониторинга проведена оценка регистрационных возможностей в районе Солнцевского угольного разреза с учетом локальных особенностей затухания волн и уровня сейсмических шумов на станциях. Для расчетов использовались уравнения

макросейсмического поля для Сахалина [Oskorbin, Bobkov, 1997], а также шумовая обстановка на каждой станции сети, измеренная опытным путем. Расчеты производились с помощью программы Sarra [Dyagilev, 2020]. Результаты оценки представлены на рис. 1, б, в виде изолиний.

В тот же период (май 2021 г.) на территории Хабаровского края была развернута временная сеть станций Центрального отделения ФИЦ ЕГС РАН, которая, в сочетании со станцией «Ванино», входящей в инструментальную сеть ДВО РАН [Khanchuk et al., 2011], позволяет скорректировать субмеридиональное расположение станций на о. Сахалин для более точного определения эпицентров землетрясений в исследуемом районе (рис. 1, а).

Полный перечень оборудования станций представлен в табл. 1.

Сочетание широкополосного оборудования и станций сильных движений позволяет исследовать геофизические процессы в широком частотном диапазоне, а дополнение сети короткопериодными сейсмическими станциями значительно повысит регистрационные возможности по мониторингу локальной сейсмичности района исследования.

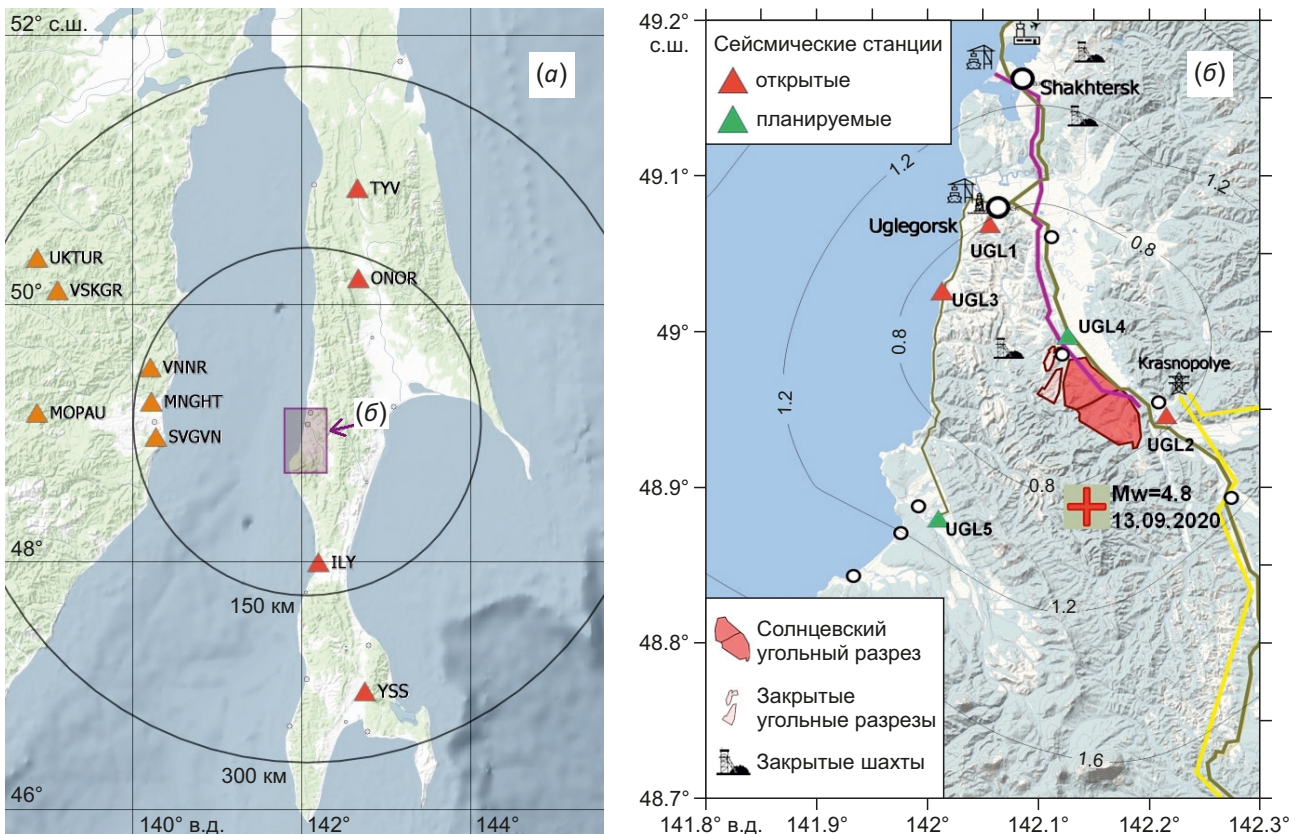


Рис. 1. Сейсмические станции сети (а) и территория мониторинга (б). (б) – объекты инфраструктуры: коричневые линии – автодороги, желтая линия – магистральная линия электропередачи (220 кВ), фиолетовая линия – угольный конвейер. Изолинии показывают расчетные регистрационные возможности сети.

Fig. 1. Stations of the seismic network (а) and monitoring area (б). (б) – infrastructure facilities: brown lines are highways, a yellow line is the main power transmission line with a substation (220 kV), a purple line is the coal conveyor. The contour lines show the calculated recording capabilities of the network.

Таблица 1. Перечень станций и используемого оборудования для мониторинга района угледобычи
Table 1. List of stations and equipment for monitoring the coal mining area

Код станции	Местонахождение	Тип регистратора	Тип сейсмометра	Полоса пропускания, Гц	Дата установки оборудования
Постоянные стационарные станции					
VNNR	п. Ванино, Хабаровский край	RefTek 130-01	RefTek 151-120	0.0083–50	2009
UGL1	г. Углегорск, Сахалинская обл.	Guralp CMGCD	Guralp CMG-6TD	0.033–100	12.09.2010
YSS	г. Южно-Сахалинск, Сахалинская обл.	Quanterra Q330HR	Streckeisen STS-2.5	0.00833–50	29.11.2017
TYV	пгт Тымовское, Сахалинская обл.	DATAMARK LS-7000XT	Streckeisen STS-2	0.00833–50	26.06.2005
ILY	с. Ильинский, Сахалинская обл.	Guralp CMGDM	Guralp CMG-5TDE	1–100	06.07.2013
ONOR	с. Омор, Сахалинская обл.	Guralp CMGDM	Guralp CMG-5TDE	1–100	24.08.2016
Временная сеть станций в Хабаровском крае					
SVGVN	г. Советская Гавань	Guralp CMGDM	Guralp CMG-5TDE	1–100	19.05.2021
MNGHT	п. Монгохто, Ванинский р-н,	Guralp CMGCD	Guralp CMG-6TD	0.033–100	21.05.2021
MOPAU	метеостанция Мопая, Ванинский р-н	Guralp CMGCD	Guralp CMG-6TD	0.033–100	23.05.2021
VSKGR	р.п. Высокогорный, Ванинский р-н	Guralp CMGCD	Guralp CMG-6TD	0.033–100	26.05.2021
UKTUR	п. Уктур, Комсомольский р-н	Guralp CMGCD	Guralp CMG-6TD	0.033–100	27.05.2021
Временная сеть станций в Углегорском районе Сахалинской области					
UGL2	с. Краснополье	Nanometrics Centaur	Trillium Compact 120s	0.0083–50	22.04.2021
UGL3	мыс Хокуй	Nanometrics Centaur	Trillium Compact 120s	0.0083–50	22.04.2021
UGL4	с. Никольское	Geosig GMS-18	СПВ-3к	0.5–65	2022 планируется
UGL5	с. Поречье	Geosig GMS-18	СПВ-3к	0.5–65	2022 планируется

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ В РАЙОНЕ УГЛЕДОБЫЧИ

По результатам обработки записей волновых форм, полученных новым оборудованием в период с 22 апреля по 30 ноября 2021 г. авторами создан каталог сейсмических событий в районе Солнцевского угольного разреза, включающий как землетрясения, так и промышленные взрывы, производимые на Солнцевском угольном разрезе. Общее количество обработанных событий – 164, из них – 127 промышленные взрывы и 37 – землетрясения, в том числе 26 землетрясений в радиусе 50 км от Солнцевского угольного разреза (рис. 2).

Использование данных новой сети, очевидно, значительно повышает точность определения эпицентров взрывов. Врезка на рис. 2 подтверждает, что основные вскрышные работы проводились в южной части разреза. Ввод в эксплуатацию новых станций также помогает решать проблему детерминирования взрывов и землетрясений.

На основе записи новых станций, а также записи других станций сейсмических сетей на Дальнем Востоке авторами с помощью вычислительного модуля FOCMES, интегрированного в комплекс сейсмологических программ SEISAN [Ottemöller et al., 2011], определены механизмы очагов ряда землетрясений (рис. 2), произошедших в радиусе 50 км от угольного разреза в 2021 г. с момента установки новых станций ФИЦ ЕГС РАН. Природа землетрясений, произошедших 28.05.2021 г., $M_L=3.1$; 02.10.2021 г., $M_L=2.5$; 26.10.2021 г., $M_L=3.3$, связана с зоной Западно-Сахалинского регионального разлома,

который, в свою очередь, проявляется в виде системы взаимосвязанных сбросов и взбросов, сопровождающихся нарушениями северо-западного и северо-восточного простирания [State Geological Map..., 2017]. Все три сейсмических события имеют характерные для зоны Западно-Сахалинского разлома типы сейсмодислокаций (два сброса и один взброс) и, очевидно, вызваны тектоническими причинами. Землетрясения, произошедшие 07.07.2021 г., $M_L=2.0$; 27.08.2021 г., $M_L=2.3$ и 16.10.2021 г., $M_L=3.6$, квалифицируются как сдвиги. Как видно из рис. 2, эти сейсмические события произошли непосредственно в районе Солнцевского угольного разреза, что может говорить об изменении характера сейсмичности от естественной к смешанной природно-техногенной. В качестве подтверждения изменения характера сейсмичности и причин возникновения землетрясений в районе исследования необходимо обратить внимание на сейсмодислокации двух сильнейших землетрясений, произошедших в Углегорском районе за последние 20 лет. Механизмы очага землетрясения 2000 г. и самых сильных его афтершоков определены в работе [Poplavskaya et al., 2011] как взбросы (либо сбросы), что характерно для большинства землетрясений, происходящих на территории о. Сахалин. Подвижка в очаге землетрясения 13 сентября 2020 г. и его крупнейшего афтершока ($M_w=4.5$) реализовалась в условиях горизонтального субширотного растяжения и близгоризонтального субмеридионального сжатия и характеризуется как сдвиг [Semenova et al., 2020].

Таким образом, систематизируя полученные результаты, можно сделать вывод о правильности интеграции

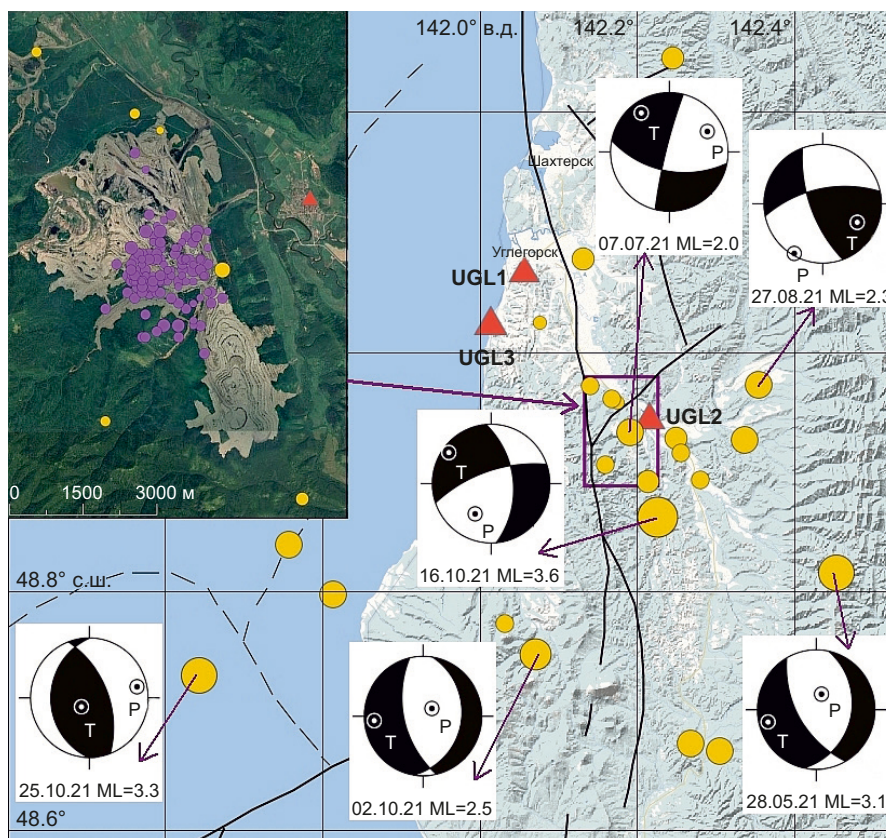


Рис. 2. Положение эпицентров зарегистрированных событий. На врезке – территория Солнцевского угольного разреза. Желтые круги – землетрясения (магнитуда ML от 0.5 до 3.6), фиолетовые круги – промышленные взрывы (магнитуда ML от 0.4 до 1.7). Геологические структуры (разломы) нанесены на карту согласно [Petrov, 2016].

Fig. 2. Recorded earthquake epicenters in the study area. The inset shows the territory of the Solntsevsky coal mine. Yellow circles are earthquakes (magnitude ML 0.5 to 3.6), purple circles are industrial explosions (magnitude ML 0.4 to 1.7). Geological structures (faults) are mapped after [Petrov, 2016].

сейсмических данных различных сетей наблюдений для проведения мониторинга локальных сейсмоактивных территорий. Дальнейшие исследования в этом направлении должны показать, с чем связаны изменения фокальных механизмов в районе угледобычи – с техногенным влиянием или же с формированием данного месторождения на участке с аномальным напряженным состоянием.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены результаты работы системы сейсмического мониторинга в Сахалинской области как части УНУ для осуществления более детальных наблюдений в районе Солнцевского угольного разреза. Для надежной интеграции сейсмических данных к работе системы были привлечены новые станции, установленные в мае 2021 г. в Хабаровском крае. Созданная система мониторинга позволяет вести представительную регистрацию сейсмических событий на уровне магнитуды ML=0.5 в непосредственной близости от угольного разреза, что дает возможность с повышенной точностью контролировать слабую сейсмичность, сформировавшуюся под постоянным техногенным

воздействием на недра. Интеграция данных, поступающих с новых пунктов сейсмических наблюдений, значительно повышает точность определения эпицентров и взрывов, а также позволяет проводить расчеты по определению типов механизмов очагов землетрясений для более детального понимания причин их возникновения и возможных воздействий на объекты инфраструктуры района мониторинга.

5. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

6. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.
The authors have no conflicts of interest to declare. The authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Adushkin V.V., Turuntaev S.B., 2015. Technogenic Seismicity – Induced and Triggered. Institute of Geosphere Dynamics, Moscow, 364 p. (in Russian) [Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.].

Dyagilev R.A., 2020. Software for Calculating Recording Capabilities of Seismic Networks and Groups, SARra: Certificate for the State Registration of Software Package for Computer No. RU 2020662170 of October 10, 2020. ROSPATENT, Moscow (in Russian) [Дягилев Р.А. Программа расчета регистрационных возможностей сейсмических сетей и групп, SARra: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2020662170 от 09.10.2020 г. М.: РОСПАТЕНТ, 2020].

Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Leskova E.V., Shevkunova E.V., Podkorytova V.G. 2014. Mining-Induced Seismicity at Open Pit Mines in Kuzbass (Bachatsky Earthquake on June 18, 2013). Journal of Mining Science 50, 224–228. <https://doi.org/10.1134/S1062739114020033>.

Khanchuk A.I., Kononov A.V., Sorokin A.A., Korolyov S.P., Gavrillov A.V., Bormotov V.A., Serov M.A., 2011. Instrumentation and Information Technology for Seismological Research in the Far East of Russia. Bulletin of FEB RAS 3, 127–137 (in Russian) [Ханчук А.И., Коновалов А.В., Сорокин А.А., Королев С.П., Гаврилов А.В., Бормотов В.А., Серов М.А. Инструментальное и информационно-технологическое обеспечение сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке России // Вестник ДВО РАН. 2011. № 3. С. 127–137].

Kostylev D.V., Boginskaya N.V., Zakupin A.S., 2022. Seismic Activity in the Focus of the Ulegorsk Earthquakes, Sakhalin Island, Related to Intensive Development of Coal Deposits. Pure and Applied Geophysics. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02933-6>.

Oskorbin L.S., Bobkov A.O., 1997. Macroseismic Effects in the Southern Far East. In: R.Z. Tarakanov, A.I. Ivashchenko (Eds), Geodynamic Development of the Tectonosphere of the Eurasia-Pacific Junction. Vol. VI. Problems of Seismic Hazard of the Far East. IMGG FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, p. 45–64 (in Russian) [Оскорбин Л.С., Бобков А.О. Макросейсмическое проявление землетрясений на территории

южной части Дальнего Востока // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Т. VI: Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона / Ред. Р.З. Тараканов, А.И. Иващенко. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 45–64].

Ottmøller L., Voss P., Havskov J., 2011. SEISAN Earthquake Analysis Software: for Windows, Solaris, Linux and MacOSx. Available from: <https://www.uib.no/rg/geodyn/artikler/2010/02/software> (Last Accessed December 08, 2021).

Petrov O.V. (Ed.), 2016. Geological Map of Russia and Adjacent Water Areas. Scale 1:2500000. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg (in Russian) [Геологическая карта России и прилегающих акваторий. Масштаб 1:2500000 / Ред. О.В. Петров. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2016].

Poplavskaya L.N., Rudik M.I., Nagornyykh T.V., Safonov D.A., 2011. Catalogue of Focal Mechanisms of Strong ($M \geq 6.0$) Earthquakes in the Kuril-Okhotsk Region of 1964–2009. Dal'nauka, Vladivostok, 131 p. (in Russian) [Поплавская Л.Н., Рудик М.И., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. Каталог механизмов очагов сильных ($M \geq 6.0$) землетрясений Курило-Охотского региона 1964–2009 гг. Владивосток: Дальнаука, 2011. 131 с.].

Semenova E.P., Boginskaya N.V., Kostylev D.V., 2020. Ulegorsk Earthquake on September 13, 2020 (Sakhalin Island): Preconditions for the Occurrence and the Results of Observations in the Epicentral Zone. Geosystems of Transition Zones 4 (4), 474–485 (in Russian) [Семенова Е.П., Богинская Н.В., Костылев Д.В. Углегорское землетрясение 13 сентября 2020 года (о. Сахалин): предпосылки возникновения и результаты наблюдений в эпицентральной зоне // Геосистемы переходных зон. 2020. Т. 4. № 4. С. 474–485]. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.474-485>.

State Geological Map of the Russian Federation, 2017. Far Eastern Series. Scale 1:1000000. Sheet M-54 (Alexandrovsk-Sakhalinsky). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 609 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Дальневосточная. Масштаб 1:1000000. Лист М-54 (Александровск-Сахалинский): Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2017. 609 с.].