

УДК 550.34

РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В АКВАТОРИИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ И В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОННЫХ СЕЙСМОГРАФОВ

© 2023 г. С. А. Ковачев¹, *, А. А. Крылов¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: kovachev@ocean.ru

Поступила в редакцию 24.01.2022 г.

После доработки 25.10.2022 г.

Принята к публикации 29.10.2022 г.

Институт океанологии в 2007–2015 гг. выполнял сейсмологические наблюдения в акватории Балтийского моря и на его побережье с помощью автономных сейсмических станций. Здесь, в районе Самбийского п-ова, ранее считавшимся асейсмичным, в 2004 г. произошло сильное ощутимое землетрясение с магнитудой порядка $M = 4.6$. Наиболее интересные данные ИО РАН были получены в 2008–2009 гг. в результате сейсмологического мониторинга, проводившегося с помощью автономных донных и береговых сейсмических станций. Данные, полученные в 2010–2015 гг., по разным причинам (потери донных сейсмографов, высокий уровень шума на береговых станциях и др.), оказались непригодными для полноценной обработки. Сейсмологический мониторинг на западе Калининградской области и в примыкающей акватории Балтийского моря позволил обнаружить слабые землетрясения с магнитудами ($M_L = 2.5–3$), очаги которых приурочены к району разработки Кравцовского морского углеводородного месторождения. Некоторые из этих землетрясений записаны норвежской системой сейсмических станций NORSTAR и сейсмическими станциями Швеции. Кравцовское месторождение расположено на шельфе к северо-западу от уникального природного объекта – Куршской косы. Обнаруженные слабые землетрясения, возможно, имеют техногенную природу, связанную с нарушением пластового давления из-за интенсивной добычи углеводородного сырья, и, возможно, являются предвестниками сильного техногенного землетрясения.

Ключевые слова: Балтийское море, сейсмическая опасность, сейсмологический мониторинг, донный сейсмограф, техногенное землетрясение.

DOI: 10.31857/S0002333723020072, EDN: LHXUYE

ВВЕДЕНИЕ

Запад Калининградской области (Самбийский полуостров) и примыкающая к нему акватория Балтийского моря оказались в уникальном в сейсмологическом отношении районе. Это связано с двумя обстоятельствами.

21 сентября 2004 г. здесь совершенно неожиданно произошла серия землетрясений. Положение их эпицентров было определено у северо-западного побережья Калининградской области в акватории Гданьского залива в Балтийском море (наиболее достоверные данные приводятся в работах [Ассиновская, Овсов, 2008; Уломов и др., 2008; Gregersen et al., 2007]).

Значительное количество толчков, вызванных этими землетрясениями, ощущалось людьми, а форшоки и множество афтершоков основного сейсмического события были зарегистрированы европейскими и другими сейсмостанциями.

Наиболее сильным был толчок в 13 ч 32 мин по Гринвичу (15 ч 32 мин местного времени). Он имел магнитуду $M_s = 4.3$ по данным Геофизической службы РАН [www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/new/map-Custom.pl?l=0&lat=55&lon=20&num=30&rad=300]. Ему предшествовало землетрясение с $M_s = 4.1$, произошедшее в 11 ч. 05 мин. по Гринвичу Третий, менее сильный, толчок с магнитудой $M_s < 4.0$, произошел в 13 ч 36 мин по Гринвичу. Координаты эпицентра наиболее сильного из этих землетрясений, согласно работе [Ассиновская, Овсов, 2008] следующие: $\varphi = 54.9^\circ$ с.ш. и $\lambda = 19.9^\circ$ в.д. Глубина очага, по-видимому, составляла не менее 20 км [Ассиновская, Овсов, 2008]. Область очага землетрясения была приурочена к зоне сейсмической активности, расположенной в Балтийском море западнее Самбийского полуострова. Моментная магнитуда главного толчка землетрясения составила $M_w = 4.7$ по данным Гарвардского центра (США), а механизм очага

соответствовал левостороннему сдвигу [Gregersen et al., 2007].

Это землетрясение, имевшее умеренную по величине магнитуду, вызвало значительные макросейсмические эффекты к западу от Калининграда на территории Самбийского п-ова. Здесь на слабых в сейсмическом отношении грунтах возникли довольно крупные деформации, соответствующие 7–8 балльным сейсмическим воздействиям: оползни, провалы, трещины и т.п., свойственные землетрясениям с более значительными магнитудами. Сейсмические сотрясения земной поверхности от землетрясения, произошедшего в 13 ч 32 мин, ощущались на всей территории Калининградской области, в Прибалтийских государствах, включая Литву, Эстонию, Латвию и Финляндию, на значительной территории Беларуси и Польши, в восточной Дании и в Санкт-Петербурге. Для средних грунтов (согласно СНиП II-7-81* [СП 14.13330.2018, 2018]) при основном толчке 21 сентября в 13 ч 32 мин у северо-западного побережья Калининградской области выделен участок 6-ти балльных сотрясений. Он расположен в Балтийском море к западу от Самбийского п-ова [Ассиновская, Овсов, 2008]. Кроме того, сейсмическая активизация района проявилась в виде целой серии других, менее сильных толчков, зарегистрированных только сейсмографами [Gregersen et al., 2007].

Ранее этот район рассматривался как слабосейсмичный (практически асейсмичный), и согласно карте общего сейсмического районирования ОСР-97 [ОСР-97, 2000; Уломов и др., 2008] относился к зоне возможных 5-ти балльных сейсмических сотрясений для грунта 2-ой категории. Скорее всего, медленные тектонические процессы, характерные для платформенных областей, либо более интенсивные на их границах, привели к накоплению тектонических напряжений в земной коре района и возникновению серии сейсмических событий в сентябре 2004 г.

Этот район РФ также выделяется тем, что для него существенным образом различаются карты общего сейсмического районирования ОСР-2015 [СП 14.13330.2018, 2018] и ОСР-2016 [Уломов и др., 2016]. Т.е. у разных коллективов высокопрофессиональных российских сейсмологов, принимавших участие в составлении нормативных документов для Калининградской области, получились различные оценки основных параметров исходной сейсмичности.

В акватории Балтийского моря к северу от Самбийского полуострова происходит интенсивная разработка морского нефтегазового Кравцовского месторождения. Откачка углеводородного сырья из недр земли может приводить к перераспределению пластового давления в земных недрах и, как следствие, возникновению сильного

землетрясения техногенной природы [Мельников, Калашник, 2008; Адушкин, Турунтаев, 2005].

Зачастую техногенные землетрясения происходят на территориях и в акваториях, которые ранее не рассматривались как сейсмически опасные, это приводит к тяжелым последствиям из-за неожиданности сейсмической катастрофы. Для морских акваторий это еще более актуально, т.к. разрушительные сейсмические воздействия на морские нефтедобывающие и нефтетранспортирующие сооружения могут привести к значительной по масштабу экологической катастрофе из-за разлива нефти.

Порой такие техногенные катастрофы по силе значительно превосходят естественные. Так, в XX в. повсеместно происходили сильные и катастрофические землетрясения на разрабатываемых месторождениях нефти и газа. К примеру, на месторождении Вилмингтон в США, которое разрабатывается с 1926 г., такие чрезвычайные происшествия случались регулярно почти два десятилетия — в 1947, 1949, 1951, 1954, 1956 и 1961 гг. Земная поверхность опустилась до восьми метров, разломы на почве достигали полуметра. Из-за сильных разрушений пришлось прекратить работы на 200 скважинах. В настоящее время весь регион, где располагается это месторождение, закрыт [Богоявленский и др., 2016].

Сильное землетрясение на месторождении Коалинга в США в 1983 г. нанесло колоссальный ущерб промышленным объектам и инфраструктуре [Mavko et al., 1983]. Вследствие разработки углеводородного сырья подобные сейсмические катастрофы произошли в других местах: серия Газлийских техногенных землетрясений 1976 и 1984 гг. в Узбекистане [Кузьмин, 2019; Родкин, Рукавишникова, 2018], Нефтегорское землетрясение 1995 г. в России [Адушкин, 2013]. Из 3000 жителей Нефтегорска погибли 1999 человек, а остальные получили травмы различной степени тяжести. Региону нанесен колоссальный материальный ущерб. В настоящее время проявляются сильные землетрясения в Тюменской области России, в Башкортостане, Татарстане и многих других регионах [Адушкин, Турунтаев, 2005].

Как уже отмечалось, согласно карте общего сейсмического районирования территории России ОСР-97 Калининградская область относилась к относительно безопасному в сейсмическом отношении району, где, по этой карте, были возможны сотрясения до 5 баллов для средних грунтов (фоновая сейсмичность).

Однако альтернативные оценки параметров сейсмической опасности, противоречат карте ОСР-97 [Никонов, 2005; Рогожин и др., 2014]. Согласно действующим нормативным картам общего сейсмического районирования территории России Калининградская область относится к 6

Таблица 1. а) Координаты и сроки работы сейсмографов ИО РАН в Калининградской области в 2008 г.

| Название точки | Широта, N | Долгота, E | Дата установки | Дата снятия | Местоположение |
|----------------|-----------|------------|----------------|---------------|--------------------------------------|
| АСС-5 | 54°48'030 | 20°05'644 | 01.04.2008 | 01.07.08 г. | Закопанный, 11 км дороги на Приморск |
| АСС-4 | 54°50'606 | 20°43'251 | 01.04.2008 | 01.07.08 г. | Закопанный, район с. Соколовка |
| ДС-2 | 54°57'788 | 20°23'357 | 02.04.2008 | 03.07.2008 г. | Донный, траверз поселка Куликово |

б) Координаты и сроки работы сейсмографов ИО РАН в Калининградской области в 2009 г.

| Название точки | Широта северная | Долгота восточная | Дата установки | Дата снятия | Примечание |
|----------------|-----------------|-------------------|----------------|---------------|--------------------------------------|
| АСС-4 | 54°48'026 | 20°05'648 | 07.07.2009 | 21.09.2009 г. | Закопанный, 11 км дороги на Приморск |
| АСС-5 | 54°50'627 | 20°43'265 | 07.07.2009 | 21.09.2009 г. | Закопанный, Соколовка |
| ДС-2 | 55°19'418 | 20°44'273 | 10.07.2009 | 10.10.2009 г. | Донный, Балтийское море |

балльной зоне для периода повторяемости сейсмических воздействий 500 и 1000 лет (карты ОСР-2015 А,В) и к 7 балльной зоне для периода повторяемости 5000 лет (карта ОСР-2015С) [СП 14.13330.2018, 2018].

Кроме того, сочетание двух вышеприведенных факторов — возможная техногенная и проявившаяся природная сейсмичность района заставляет пересмотреть сложившиеся представления о степени сейсмической опасности. Для получения новых оценок возможных сейсмических воздействий для районов Калининградской области необходимы новые данные о землетрясениях, здесь происходящих, включая слабые и микросейсмические события.

Начиная с 2007 г., Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН проводит на территории Самбийского п-ова и в примыкающей к его побережью акватории Балтийского моря сейсмологические наблюдения с использованием высокочувствительных автономных донных и наземных сейсмических станций. Наблюдения 2007 г. показали, что сейсмический процесс на западе Калининградской области продолжается и представлен отдельными слабыми сейсмическими событиями с магнитудами $M_L = 3.4-3.5$ (локальная магнитуда по Рихтеру) [Ковачев, 2008].

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В сейсмологическом эксперименте 2008 г. в Калининградской области использовались автономные сейсмографы типа РС-4 разработки ИО РАН. Подробное описание приборов приводится в работе [Ковачев, 2008].

Сейсмографом регистрируются сигналы вертикального сейсмоприемника СВ-5, гидрофона ГГ-7 и двух ориентированных ортогонально друг к другу горизонтальных сейсмоприемников СВ-5М (в постановках на суше гидрофон не использовался.) Сейсмоприемники по существу являются

датчиками скорости колебаний земной поверхности (велосиметрами) электродинамического типа. Гидрофоном записываются колебания давления воды в придонном слое. Для ориентирования сейсмических датчиков по вертикали они помещаются в карданный подвес.

Регистрация сигналов производится непрерывно на 5-канальный цифровой регистратор, изготовленный на базе спецпроцессора TMS320VC-5410 фирмы Texas Instruments с 16-ти разрядным аналого-цифровым преобразователем AD73360 фирмы Analog Devices. Первый записываемый канал — вертикальный сейсмопреобразователь, второй и третий каналы — горизонтальные сейсмопреобразователи, четвертый канал — гидрофон, на пятый канал записываются импульсы высокостабильных термостатированных кварцевых часов с периодом 1 сек и кодом абсолютного времени. Частота оцифровки в регистраторе может выбираться, в описываемом эксперименте она равнялась 64 Гц. Конечные файлы информации сохранялись в формате Golden Software на флеш-карте (CompactFlas) емкостью 4 Гб.

В 2008 г. сейсмические и гидроакустические сигналы регистрировались в диапазоне частот от 3 до 30 Гц, динамический диапазон записи составлял 96 дБ. Точность определения моментов времени на записях сейсмографов была не хуже 0.05 секунды за весь период регистрации.

Сейсмологические наблюдения 2008 г. являлись продолжением работ 2007 г. [Ковачев, 2008]. В этих исследованиях были задействованы 3 автономные сейсмические станции ИО РАН, две из них были установлены на суше и одна на дне моря (рис. 1, табл. 1а). Координаты и сроки работы приборов в 2009 г. приводятся в табл. 1б.

Выбор мест установки 2 наземных сейсмических станций определялся двумя моментами: 1) максимальное удаление от источников техногенного шума (для Калининградской области — это в основном автотранспорт) и 2) более-менее

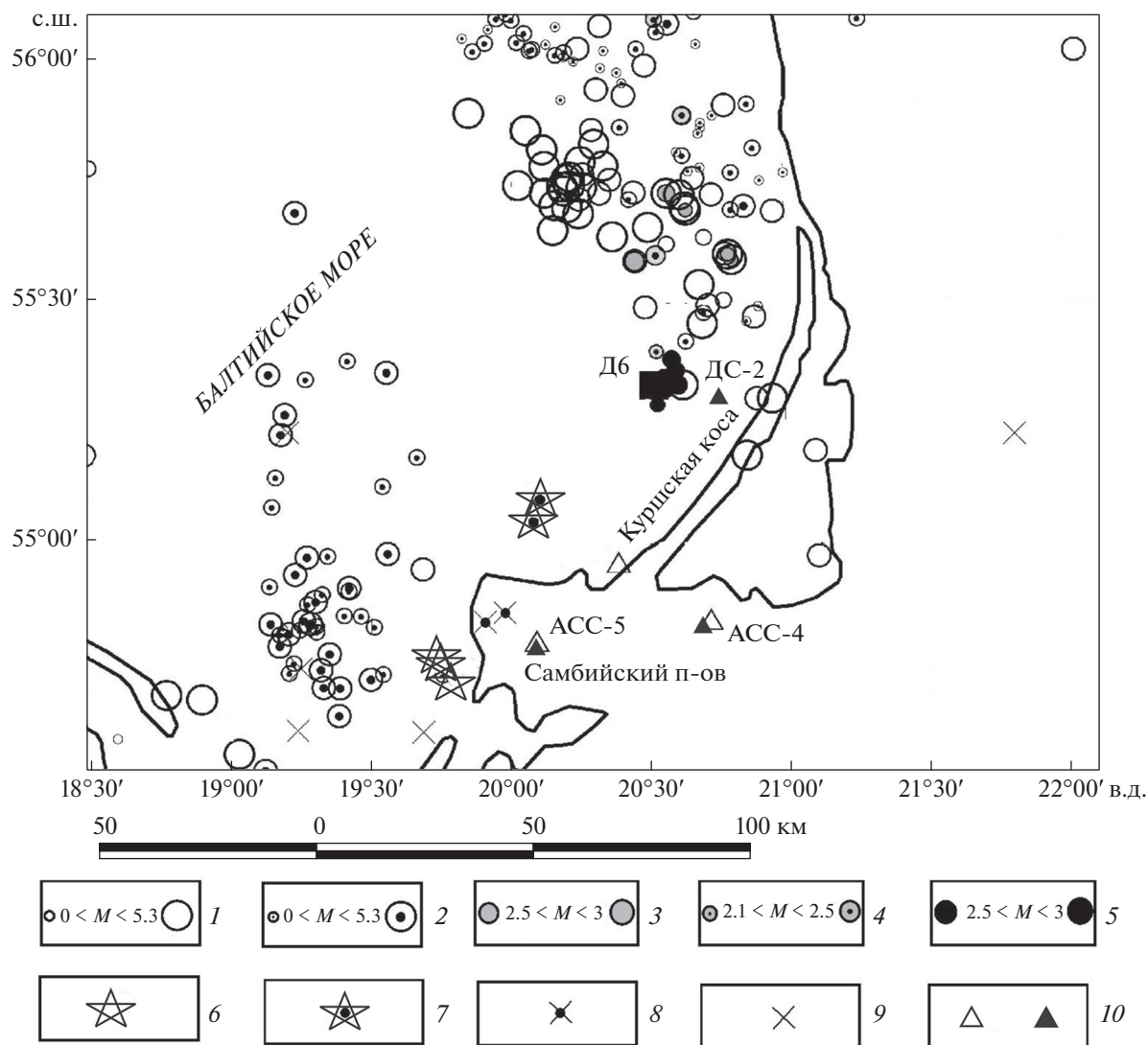


Рис. 1. Положение автономных донной и наземных сейсмических станций ИО РАН на западе Калининградской области и в акватории Балтийского моря в эксперименте 2008 г. и эпицентры землетрясений Юго-Восточной Балтики, взятые из разных источников: 1 – эпицентры землетрясений по данным сейсмостанций Швеции [http://sn-sn.geofys.uu.se/] за период наблюдений 2000–2008 гг.; 2 – эпицентры землетрясений по данным сейсмостанций системы NORSAR за период наблюдений 1998–2008 гг. [http://www.norsar.no/NDC/bulletins/]; эпицентры землетрясений, зарегистрированных в мае 2008 г.: 3 – по данным сейсмостанций Швеции, 4 – по данным сейсмостанций системы NORSAR, 5 – по данным сейсмостанций ИО РАН. Эпицентры сильных сентябрьских землетрясений 2004 г. в Калининградской области: 6 – по данным сейсмостанций Швеции, 7 – по данным сейсмостанций системы NORSAR, 8 – по данным NEIC (Геологическая служба США) [https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/]; 9 – другие эпицентры по данным NEIC; 10 – места установки сейсмостанций ИО РАН (в 2008 г. слева, в 2009 г. справа).

правильная геометрия сейсмометрической сети (расстановка приборов должна по форме быть близкой к треугольнику с учетом расположения донного сейсмографа).

Наземные сейсмические станции были установлены 1 апреля 2008 г.: одна в районе 11-го километра дороги на Приморск, но на значительном удалении от этой трассы (порядка 3 км в сторону); вторая – на опушке леса в районе села Соколовка также в стороне от дороги на село Соко-

ловка. Оба прибора были закопаны в грунт на глубину порядка 40 см и тщательно замаскированы.

Донный сейсмограф был установлен 2 апреля 2008 г. в Балтийском море на траверзе села Куликово на глубину 20 м, работы выполнялись с борта судна “Кембрий”, судовладелец – ООО “ЛУКОЙЛ–Калининградморнефть”.

В схеме постановки прибора на дно была предусмотрена система всплытия, состоящая из притопленного буйа и использующая акустиче-

ский размыкатель балласта. Сейсмограф крепился к бую с помощью 100-метрового отрезка капронового буйрепа. Для подъема системы на борт судна предполагалось подать команду на всплытие по акустическому каналу связи, по которой размыкатель должен сбросить балласт, а притопленный буй всплыть на поверхность моря.

Автономные сейсмические станции ИО РАН (донная и наземные), установленные в начале апреля 2008 г., были сняты 1 и 3 июля 2008 г. (табл. 1); таким образом, продолжительность синхронной работы приборов составила 3 мес.

Подъем донного сейсмографа был выполнен с катера Морского венчурного бюро и происходил при волнении моря 0.5 балла и скорости дрейфа 0.3 узла. Попытки поднять донный сейсмограф в штатном режиме по акустической команде ни к чему не привели, как выяснилось в дальнейшем, из-за неисправности источников питания размыкателя троса Агар-МП. Сейсмограф был поднят тралением. Катер, используя навигационный приемник GPS, вышел в точку, расположенную в 50 м от середины капронового буйрепа длиной 100 м, соединяющего донный сейсмограф и притопленный буй. В дрейфе за борт был выпущен трал, которым удалось зацепить буйреп, после этого все устройства были подняты на борт катера.

В 2009 г. положение наземных сейсмических станций практически не изменилось, а донный сейсмограф был приближен к платформе Д6 на расстояние порядка 15 км (см. рис. 1).

ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ 2008 Г.

На первом этапе обработки полученных данных было решено выделить на записях сигналы сильных и умеренных удаленных землетрясений, которые в отличие от местных слабых землетрясений гораздо легче обнаружить на фоне интенсивных сейсмических шумов, периодически появляющихся на записях как донного, так и наземных сейсмических станций.

Природа этих шумов и образцы записей приведены в работе [Ковачев, 2008], поэтому здесь не дается их описание, только перечисляются их источники. Для наземных приборов – это, прежде всего, шумы от автотранспорта; менее интенсивными являются помехи от дождя и ветра. Для донного сейсмографа – это шумы волнения моря, кроме того, на записях прибора эпизодически появляются сигналы от проходящих судов, помехи от воздействия придонной фауны и приборного эффекта.

Во время работы станций 12 мая 2008 г. в 6 ч 28 мин по Гринвичу в Восточном Сычуане (Китай) произошло землетрясение с магнитудой $M = 8$, повлекшее за собой человеческие жертвы и разру-

шения. Параметры землетрясения были определены Геофизической службой (ГС) РАН в г. Обнинске с использованием станционных данных, полученных с цифровых и аналоговых сейсмических станций России, стран СНГ и зарубежья [http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/new/quake_stat.pl?sta=20081536&l=0].

На рис. 2 представлены фрагменты записей этого землетрясения, полученные цифровыми станциями, входящими в систему IRIS (International Research Institute of Seismology) [<https://www.iris.edu/hq/>]: Талая (TLY, $\Delta = 20.5^\circ$), Ала Арча (AAK, $\Delta = 25.6^\circ$), Курчатова (KURK, $\Delta = 26.8^\circ$), Боровое (BRVK, $\Delta = 32.4^\circ$), Арта (ARU, $\Delta = 40^\circ$), Сеймчан (SEY, $\Delta = 44.4^\circ$), Диего Гарсиа (DGAR, $\Delta = 48.4^\circ$), Кисловодск (KIV, $\Delta = 48.7^\circ$), Ловозеро (LVZ, $\Delta = 53.5^\circ$), Пулково (PUL, $\Delta = 55.2^\circ$), Δ – угловое расстояние по дуге большого круга [http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/new/quake_stat.pl?sta=20081536&l=0].

Сигналы этого землетрясения были обнаружены на записях всех трех сейсмографов ИО РАН, работавших в Калининградской области (рис. 3а–3в). На станции АСС-5 (рис. 3б) сигнал землетрясения искажен помехой от проезжавшего автомобиля, поэтому он менее выразительный, чем на станции АСС-4 (рис. 3а). Наиболее отчетливая запись донного сейсмографа получена гидрофонным каналом и вертикальным сейсмоприемником Z (рис. 3в).

Необходимо отметить, что автономные сейсмографы ИО РАН в отличие от цифровых станций системы IRIS (рис. 2) предназначены для регистрации местных землетрясений и имеют соответствующую частотную характеристику (диапазон регистрируемых частот 3–30 Гц по уровню 0.7). Поэтому регистрация удаленного землетрясения, произошедшего на весьма большом эпицентральной расстоянии порядка 58 дуговых градусов или 6500 км (в таком случае в сигнале доминируют частоты 0.5–2 Гц), является довольно редким событием.

Сейсмографы ИО РАН записали только продольные волны от этого землетрясения, поперечные и, тем более, поверхностные волны, имеющие гораздо более низкие частоты (см. сейсмограммы на рис. 2), автономными станциями не были записаны. Однако соотношение сигнал/шум для первого и последующих вступлений продольных волн, полученное гидрофонным каналом донного сейсмографа, по крайней мере, на порядок больше аналогичного соотношения, полученного широкополосным сейсмографом на сейсмостанции Пулково (см. нижнюю сейсмограмму на рис. 2).

Эпицентральной расстояние от эпицентра Сычуанского землетрясения до сейсмостанции Пулково составляет 55° и меньше эпицентрального расстояния до донного сейсмографа ИО РАН

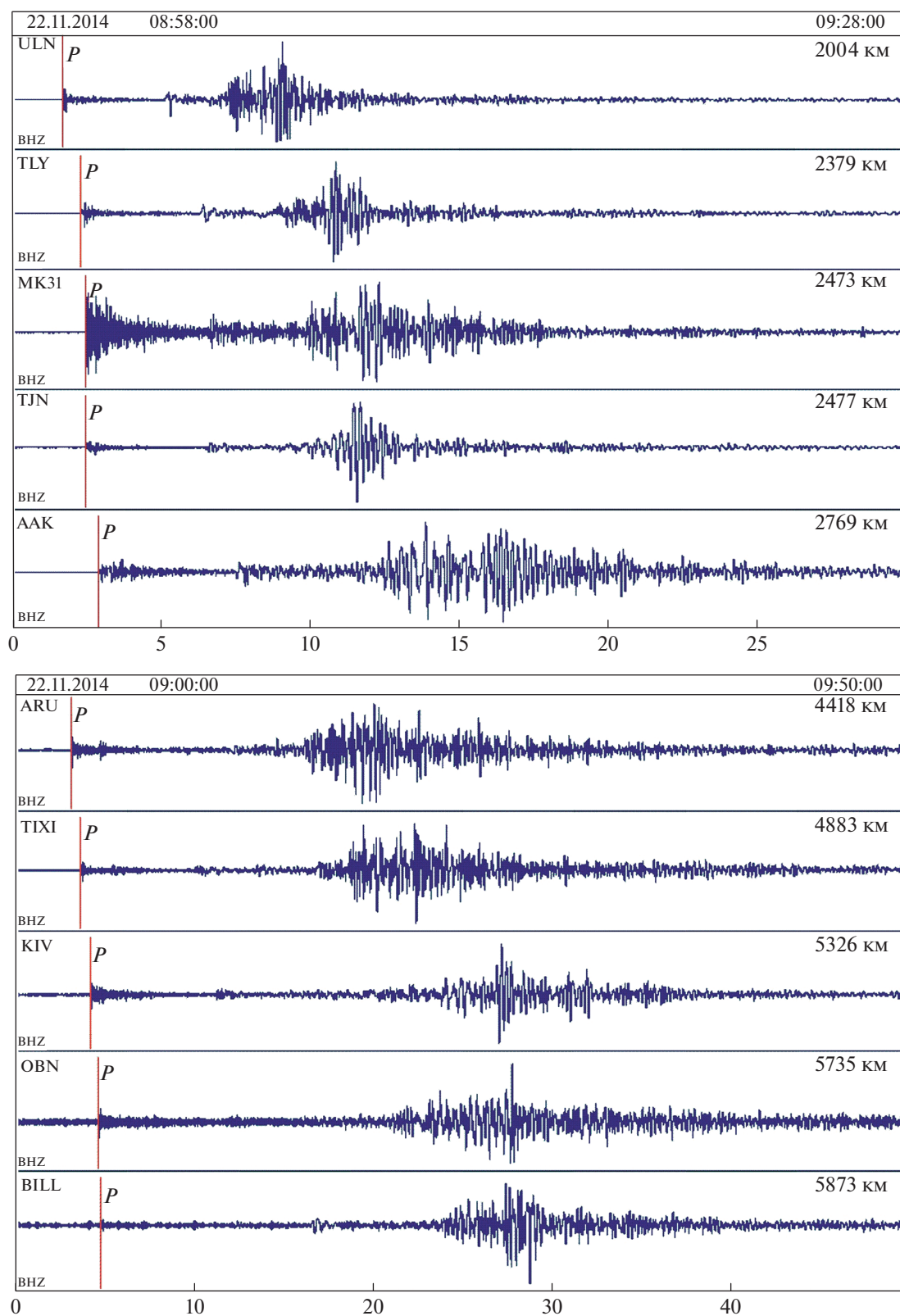


Рис. 2. Фрагменты записей землетрясения 2008-05-12 06:28:00 (Гринвич) в Восточном Сычуане, полученные цифровыми станциями: Талая (TLY), Ала Арча (AAK), Курчатова (KURK), Боровое (BRVK), Арти (ARU), Сеймчан (SEY), Диего Гарсиа (DGAR), Кисловодск (KIV), Ловозеро (LVZ), Пулковое (PUL) по данным Службы срочных донесений ГС РАН [http://www.gsras.ru/cgi-bin/new/info_quake.pl?mode=1&id=252]. Горизонтальная ось – эпицентральное расстояние в градусах.

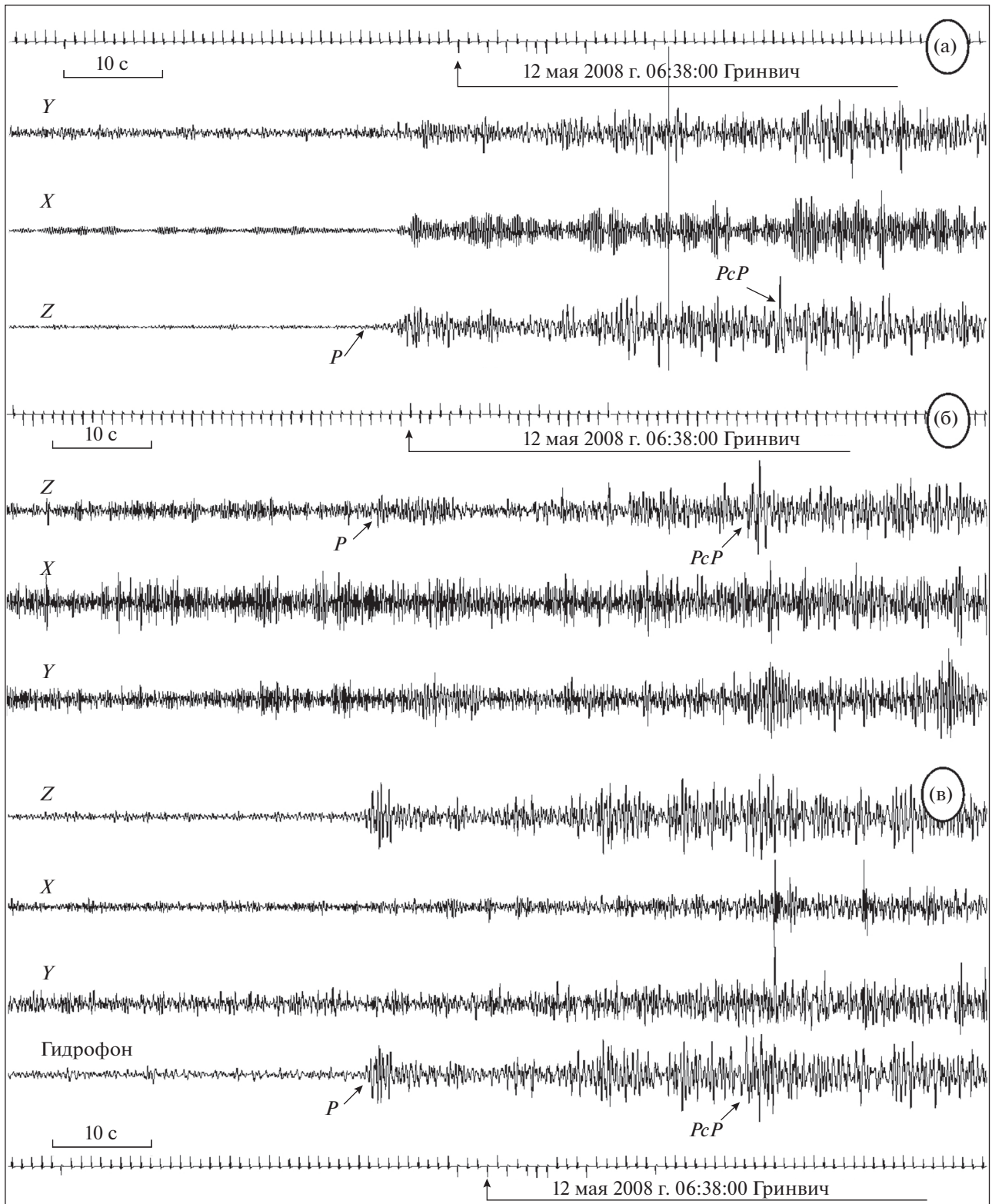


Рис. 3. Запись землетрясения 2008-05-12 06:28:00 (Гринвич) в Сычуане, полученная автономными сейсмографами ИО РАН: (а) – АСС-4, (б) – АСС-5, (в) – ДС-2. X , Y – горизонтальные и Z – вертикальный каналы сейсмографов, “Гидрофон” – запись приемника колебаний придонного давления; P – момент прихода прямой продольной волны; PcP – момент прихода продольной волны, отраженной от границы мантия–ядро Земли.

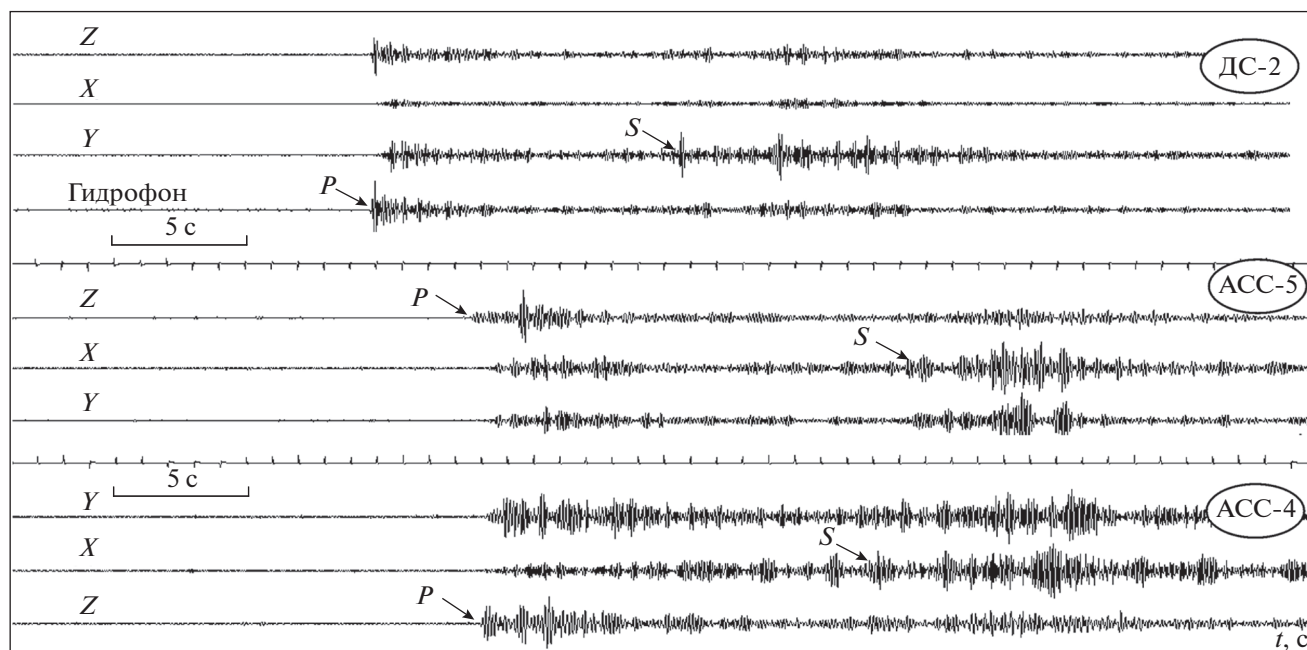


Рис. 4. Сейсмограммы землетрясения 09 мая 2008 г. (время в очаге – 15 ч 06 мин 35.1 с, магнитуда – 2.8, глубина очага – 4.51 км, координаты эпицентра: $\varphi = 55^{\circ}21.59'$ с.ш., $\lambda = 20^{\circ}36.08'$ в.д.); Z – запись вертикального сейсмометра; X и Y – записи горизонтальных сейсμοприемников; гидрофон – запись приемника колебаний придонного давления.

(58°). Это свидетельствует о том, что автономные станции ИО РАН имеют большую чувствительность в своем диапазоне частот (3–30 Гц), чем сейсмографы сейсмостанции Пулково. Поэтому на сейсмостанции Пулково и не были зарегистрированы два местных землетрясения с магнитудами 3.4 и 3.5, произошедшие на территории Калининградской области в 2007 г. и отмеченные наземными и донными станциями ИО РАН.

Возможно также, что в момент прихода волн от Сычуанского землетрясения на сейсмостанцию Пулково здесь наблюдался высокий уровень сейсмического шума (например, штормовых микросейсм). Возможно также на регистрацию сейсмических сигналов станцией Пулково из Калининградской области влияет геологическое строение среды в месте установки станции.

Последующая обработка записей донной (ДС-2) и автономных наземных (АСС-4 и АСС-5) сейсмических станций Института океанологии РАН, которые были получены в апреле-июне 2008 г. в Калининградской области, позволила обнаружить сигналы 7 местных сейсмических событий.

Все эти землетрясения произошли в период с 9 по 28 мая и были зарегистрированы на фоне сейсмических помех с приемлемым отношением сигнал/шум. Образец записи одного из этих землетрясений представлен на рис. 4 в виде трех сейсмограмм, содержащих сигналы, отмеченные всеми станциями ИО РАН.

Определение магнитуд этих землетрясений по записям донных и автономных сейсмографов с использованием традиционных методов, т.е. замерам отношения A_{\max} / t_{\max} , где A_{\max} – амплитуда максимальной фазы, а t_{\max} – ее период, вызывало затруднения, т.к. отсутствуют калибровочные кривые, описывающие затухание сейсмических волн с расстоянием для Калининградской области и восточной части Балтийского моря. Кроме того, в настоящей работе для расчета магнитуды мы использовали записи гидрофонного канала донного сейсмографа, где отношение “сигнал–шум” более высокое, чем на записях сейсмометрических каналов донного и, тем более, береговых сейсмических станций. Записи береговых станций в значительной степени “зашумлены” сигналами от автотранспорта, поэтому полученные ими данные для определения магнитуд не использовались.

Причины, заставляющие использовать записи гидрофона, также описаны в работе [Левин и др., 2010]: “Следует отметить, что гидрофонные записи слабых сейсмических событий, удаленных от места регистрации, как правило, сильно искажены шумами, и определение периода сигнала в фазе максимальной амплитуды представляет серьезное затруднение”. Определение амплитуд сейсмического сигнала на сейсмометрических каналах донных сейсмографов также затруднено из-за искажений, привносимых в запись наличием рыхлого обводненного слоя донных осадков.

Таблица 2. Скоростная модель среды для Калининградской области и примыкающей акватории Балтийского моря, использованная для определения координат местных землетрясений

| №№ | Слой | Глубина кровли и подошвы слоя, км | Скорость V_p , км/с |
|----|-------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| 1 | Осадки | 0–3 | 2.3 |
| 2 | “Гранито-диориты” | 3–10 | 3.0 |
| 3 | “Граниты” | 10–26 | 5.6 |
| 4 | “Базальты” | 26–41 | 6.4 |
| 5 | Верхняя мантия | –//– | 8.2 |

Для расчета магнитуд землетрясений была использована длительность записи сигналов (τ). Было использовано соотношение между M_D и τ в виде:

$$M_D = 3.24 \lg \tau - 3.84, \quad (1)$$

где τ – длительность коды сигнала землетрясения, т.е. время между приходом первого вступления продольной волны и временем, когда амплитуда коды не более чем в 1.5 раз превышает амплитуду фонового сейсмического шума. Это соотношение было получено в результате серии экспериментов с донными сейсмографами в районе о. Крит в Эгейском море [Соловьев, Ковачев, 1996; Соловьев и др., 1993]. Кроме того, формулу, полученную на основе таблицы Соловьева–Ковачева”, авторы работ [Левин и др., 2010; Борисов, 2013; Sasorova et al., 2008] использовали при определении магнитуд микроземлетрясений в нескольких сериях гидроакустических измерений. Эти измерения проводились в различных акваториях Тихоокеанского побережья и в сейсмоактивных районах Сахалино-Курильского региона.

Магнитуды, определенные по длительности сигнала (M_D) всех 7 землетрясений оказались относительно небольшими (2.5–3).

На сейсмограммах (см. рис. 4) четко выделяются вступления продольных (P) волн, поперечные (S) волны имеют меньшую выразительность и небольшую амплитуду. Достоверность определений их времен прихода контролировалась графиком Вадати, который демонстрирует прямопропорциональное соотношение между временами пробега волн P от очага к станции и разностей времен S - P для набора станций:

$$t_S - t_P = (1 - V_P/V_S)(t_P - t_0), \quad (2)$$

где: t_P и t_S – моменты вступлений продольных и поперечных волн; V_P и V_S – скорости продольных и поперечных волн соответственно; t_0 – время в очаге землетрясения. землетрясения и отношение скоростей продольных и поперечных сейсмических волн.

Координаты эпицентров, глубины очагов и магнитуды местных землетрясений определялись с помощью программы HYPO-71 [Lee, Lahr,

1985]. Времена вступлений продольных и поперечных волн на разных станциях, а также файлы, содержащие данные о скоростном строении земной коры и координаты сейсмических станций, являются входными данными для программы HYPO-71. С помощью этой программы рассчитываются также ошибки их вычисления и время в очаге землетрясения. Заданная для расчетов скоростная модель среды приведена в табл. 2. Она построена по данным глубинного сейсмического зондирования, проводившегося непосредственно в акватории Балтийского моря с использованием донных сейсмографов, результаты которого описаны в работе [Островский, 1998].

Результаты расчетов по программе HYPO-71 приведены в табл. 3. Очаги всех семи обработанных землетрясений оказались расположенными в Балтийском море к северу от Самбийского п-ова вблизи нефтедобывающей платформы Дб.

Для проверки полученной информации были просмотрены оперативные бюллетени и представленные на сайтах записи сейсмических станций Швеции [<http://snsn.geofys.uu.se/>]. Кроме того, подобная информация была получена такая же с сайта норвежской системы NORSAR, созданной для слежения за ядерными испытаниями на о. Новая Земля. Система имеет антенную структуру и высокую чувствительность [<https://www.norsar.no/NDC/bulletins/>].

Из 7 землетрясений, зарегистрированных сейсмостанциями ИО РАН, все 7 сейсмических событий были отмечены системой NORSAR (табл. 4) и 6 из них сейсмическими станциями Швеции (табл. 5).

На рис. 5 приведена сейсмограмма норвежской станции HFS [<https://www.norsar.no/NDC/bulletins/>], входящей в систему NORSAR, на которых стрелками отмечены приходы волн от Балтийских землетрясений, произошедших 13 мая 2008 г. и записанных сейсмографами ИО РАН. Следует отметить достаточно высокое качество и надежность записи этих землетрясений, что свидетельствует о хороших возможностях мониторинга сейсмической обстановки в акватории Восточной Балтики системой NORSAR.

Таблица 3. Параметры очагов землетрясений в мае 2008 г. в Балтийском море по данным автономных сейсмических станций ИО РАН

| Дата Год-месяц-день | Время в очаге ч мин с | С. широта град.-мин | В. долгота град.-мин | Глубина очага, км | Магнитуда M_D | Эпицентральное расстояние в км | RMS с | Ег.Z км | Ег.H км |
|------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------------|----------|------------|------------|
| 2008-05-09 | 15 h 06 m 35.1 s | 55-21.59 | 20-36.08 | 4.51 | 2.8 | 46 | 0.04 | 2.2 | 0.4 |
| 2008-05-10 | 09 h 02 m 30.1 s | 55-20.17 | 20-33.69 | 8.6 | 3 | 43 | 0.08 | 0.9 | 0.3 |
| 2008-05-10 | 16 h 38 m 41.9 s | 55-23.02 | 20-35.22 | 5.85 | 2.8 | 48 | 0.13 | 6.7 | 1.4 |
| 2008-05-11 | 22 h 38 m 43.8 s | 55-19.84 | 20-36.51 | 5.89 | 2.9 | 43 | 0.15 | 3.1 | 3.7 |
| 2008-05-13 | 12 h 37 m 55.9 s | 55-17.39 | 20-32.03 | 2.31 | 2.5 | 38 | 0.22 | 10.3 | 2.1 |
| 2008-05-13 | 16 h 21 m 02.9 s | 55-19.22 | 20-33.83 | 1.73 | 2.6 | 41 | 0.04 | 2 | 0.4 |
| 2008-05-28 | 11 h 04 m 28.9 s | 55-20.97 | 20-33.52 | 1.35 | 2.5 | 44 | 0.14 | 6.7 | 1.4 |

Таблица 4. Параметры очагов землетрясений в мае 2008 г. в Балтийском море по данным норвежских сейсмических станций системы NORSAR (автоматическое определение)

| Дата Год-месяц-день | Время в очаге ч мин с | С. широта град.-мин | В. долгота град.-мин | Глубина очага км | Магнитуда M_D | Эпицентральное расстояние в км | RMS с | Ег.Z км | Ег.H км |
|------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------------|----------|------------|------------|
| 2008-05-09 | 15 h 06 m 33.0 s | 55-53.4 | 20-37.8 | — | 2.20 | 625.5 | 2.09 | — | — |
| 2008-05-10 | 09 h 02 m 33.0 s | 55-36.0 | 20-31.8 | — | 2.48 | 647.8 | 2.42 | — | — |
| 2008-05-10 | 16 h 38 m 43.0 s | 56-09.0 | 20-15.0 | — | 2.21 | 588.1 | 1.66 | — | — |
| 2008-05-11 | 22 h 38 m 36.0 s | 55-24.0 | 20-31.8 | — | 2.10 | 665.9 | 2.03 | — | — |
| 2008-05-13 | 12 h 37 m 57.0 s | 56-48.0 | 20-31.8 | — | 2.15 | 604.1 | 0.57 | — | — |
| 2008-05-13 | 16 h 21 m 02.0 s | 55-53.4 | 20-37.8 | — | 2.27 | 625.5 | 1.46 | — | — |
| 2008-05-28 | 11 h 04 m 54.0 s | 56-17.4 | 20-58.8 | — | 2.10 | 605.3 | 0.50 | — | — |

На рис. 1 кроме положения сейсмических станций ИО РАН показано также распределение эпицентров района Юго-Восточной Балтики по данным разных источников: сейсмических служб Швеции (университет Упсала), Норвегии (NORSAR), Геологической службы США (NEIC) и Института океанологии РАН. Из рис. 1 видно, что акватория Балтийского моря, примыкающая к Куршской косе, является сейсмически активным районом, где происходят микро- и слабые землетрясения с магнитудами до 3.5. Землетрясения

этого района отмечаются сейсмической службой Швеции и сейсмической системой NORSAR.

Серия из 7 микросейсмических событий с магнитудами от 2.5 до 3 из района установки платформы Д6 была отмечена автономными сейсмическими станциями ИО РАН (рис. 6 и рис. 7). Расстояния локализованных эпицентров до платформы Д6 по данным ИО РАН составили от 2.5 до 7.5 км. Очаги этих землетрясений были определены на глубинах от 1.3 до 8.5 км (рис. 7, табл. 3). В то же время сейсмическая система NORSAR показывает, что эпицентры этих землетрясений

Таблица 5. Параметры очагов землетрясений в мае 2008 г. в Балтийском море по данным шведских сейсмических станций

| Дата Год-месяц-день | Время в очаге ч мин с | С. широта град.-мин | В. долгота град.-мин | Глубина очага км | Магнитуда M_D | Эпицентральное расстояние в км | RMS с | Ег.Z км | Ег.H км |
|------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|----------|------------|------------|
| 2008-05-09 | 15h 06m 29.7s | 55-36.1 | 20-46.98 | — | 2.7 | 269 | 0.247 | — | — |
| 2008-05-10 | 09h 02m 32.0s | 55-35.4 | 20-52-2 | — | 2.7 | 271 | 0.257 | — | — |
| 2008-05-10 | 16h 38m 37.2s | 55-41.6 | 20-38.52 | — | 2.7 | 256 | 0.252 | — | — |
| 2008-05-11 | 22h 38m 39.6s | 55-35.28 | 20-27.24 | — | 2.9 | 261 | 0.309 | — | — |
| 2008-05-13 | 12h 37m 52.0s | 55-36.1 | 20-47.64 | — | 2.7 | 270 | 0.292 | — | — |
| 2008-05-13 | 16h 21m 01.3s | 55-43.74 | 20-34.32 | — | 2.8 | 250 | 0.308 | — | — |
| 2008-05-28 | | | | | Не зарегистрировано | | | | |

Примечание к табл. 3, 4, 5: RMS — среднеквадратичная невязка моментов прихода волн от землетрясения на станции в с; Ег.Z — ошибка определения плановых координат эпицентра в км; Ег.H — ошибка определения глубины очага в км.

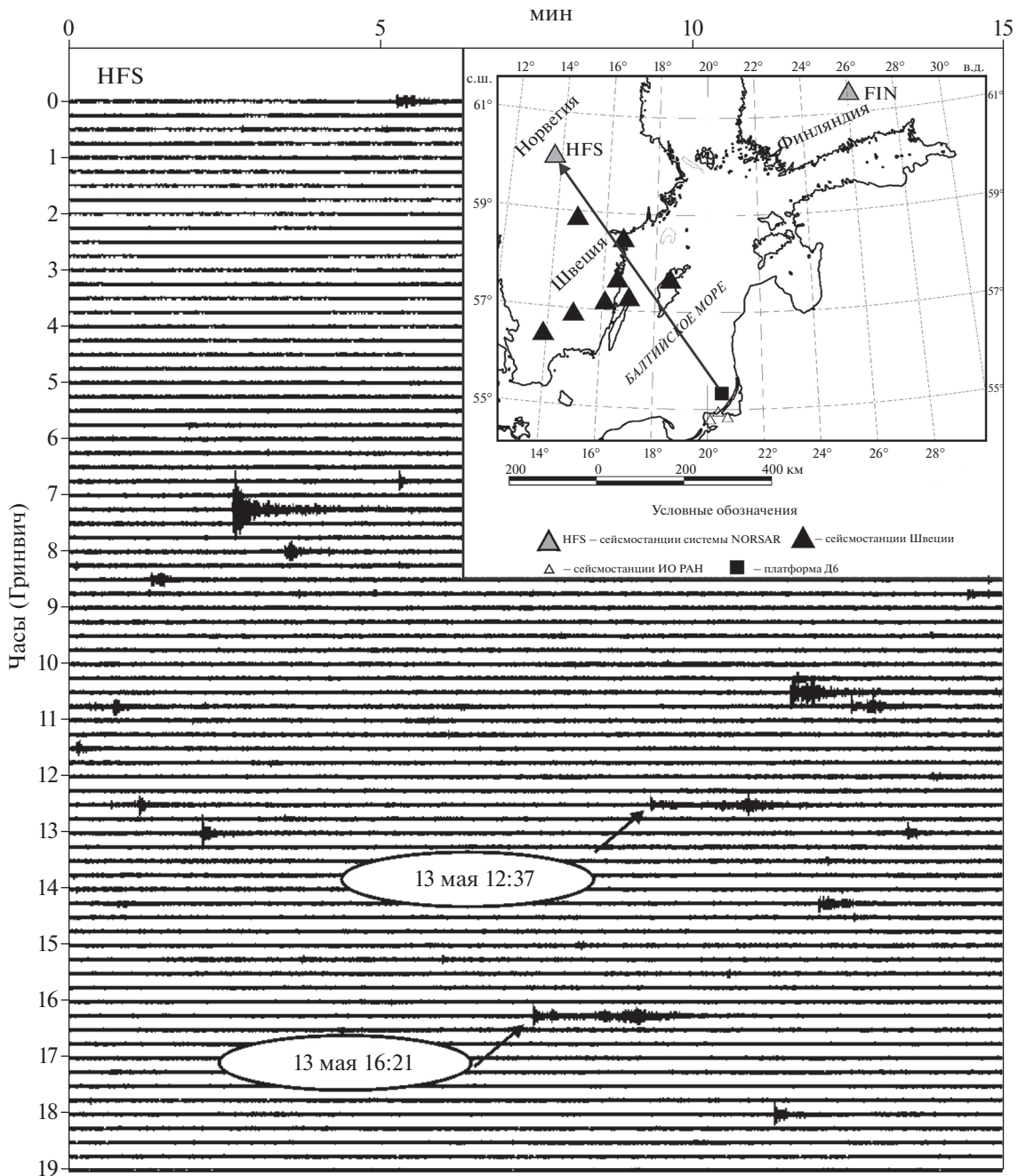


Рис. 5. Сейсмограмма норвежской станции HFS, входящей в систему NORSAR от 13 мая 2008 г. [<https://www.jordskjelv.no/seismogram/>]. Запись вертикального короткопериодного сейсмоприемника, фильтрация 2–8 Гц. Моменты прихода сейсмических волн от Балтийских землетрясений отмечены стрелками.

удалены от Д6 на расстояния от 10 до 100 км и расположены не плотной группой, как в случае очагов, определенных по данным ИО РАН, а растянутой цепочкой меридионального простирания (см. рис. 6). Определения координат очагов этих же землетрясений по данным сейсмических станций Швеции дают другую пространственную картину – эпицентры образуют треугольную область

со сторонами порядка 20 км, расположенную на расстоянии около 40 км от платформы Д6 (рис. 6).

По-видимому, наиболее достоверными определениями координат эпицентров этих землетрясения являются вычисления ИО РАН потому, что:

1. Сеть сейсмических станций ИО РАН расположена на расстоянии 40 км от изучаемого района, ближайшая шведская сейсмостанция – на

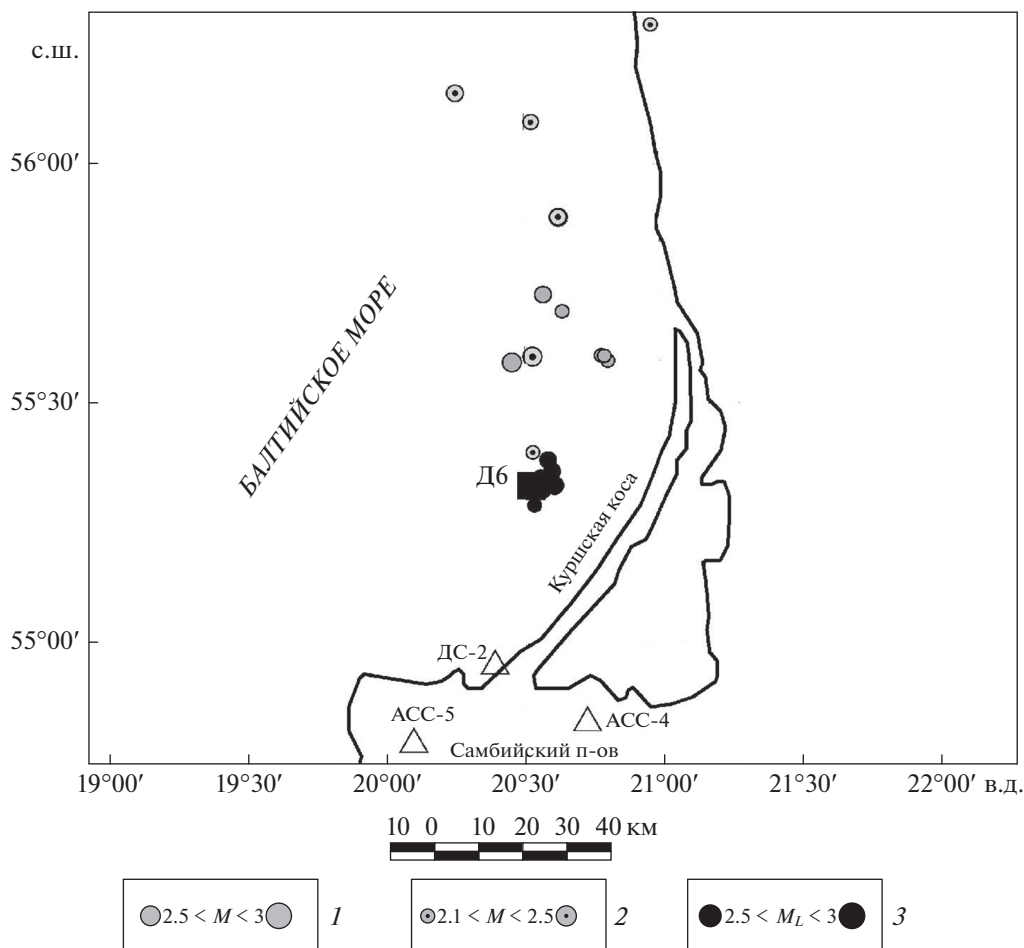


Рис. 6. Карта эпицентров майских землетрясений 2008 года района Балтийского моря, построенная по следующим данным: 1 – сейсмической службы Швеции [<http://snsn.geofys.uu.se/>]; 2 – системы NORSAR [<http://www.norsar.no/NDC/bulletins/>]; 3 – наблюдений ИО РАН.

расстоянии порядка 300 км, а самая близкая сейсмостанция NORSAR – на расстоянии 580 км.

2. Землетрясения в районе Д6, произошедшие в мае 2008 г., определены системой NORSAR автоматически с помощью обрабатывающих программ без участия оператора, и могут быть некорректными, как указывается на сайте системы NORSAR [<http://www.norsar.no/NDC/bulletins/>].

3. Даже уточненные координаты балтийских землетрясений по данным системы NORSAR приводятся в каталогах с систематической ошибкой: эпицентры сдвигаются к север-северо-востоку на расстояние порядка 25 км, как это видно на рис. 1. На рис. 1 показано положение эпицентров сильных землетрясений Калининградской области, произошедших в сентябре 2004 г. по данным шведских сейсмостанций, системы NORSAR и Геологической службой США (NEIC).

4. Кроме того, система NORSAR занижает магнитуды землетрясений на 0.2–0.7 единиц относительно альтернативных оценок, полученных

по данным временной сети ИО РАН (табл. 3–табл. 5, рис. 1). Скорее всего по причине, указанной в пункте 1.

О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ ТЕХНОГЕННОЙ ПРИРОДЫ В РАЙОНЕ КРАВЦОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В 2009 Г.

Сейсмические записи, полученные в июле–сентябре 2009 г. подтвердили наличие очагов слабых землетрясений в районе платформы Д6. Всего было отмечено 12 характерных сейсмических сигналов на записях донного сейсмографа ДС-2 (рис. 8). Зарегистрированные сейсмические сигналы (см. рис. 8) значительно различаются по амплитуде, но при этом, они весьма похожи друг на друга по форме записи и спектральному составу.

Это свидетельствует о сходных условиях генерации отмеченных землетрясений и одинаковых условиях распространения сейсмических волн. Иначе говоря, их очаги расположены близко друг к другу.

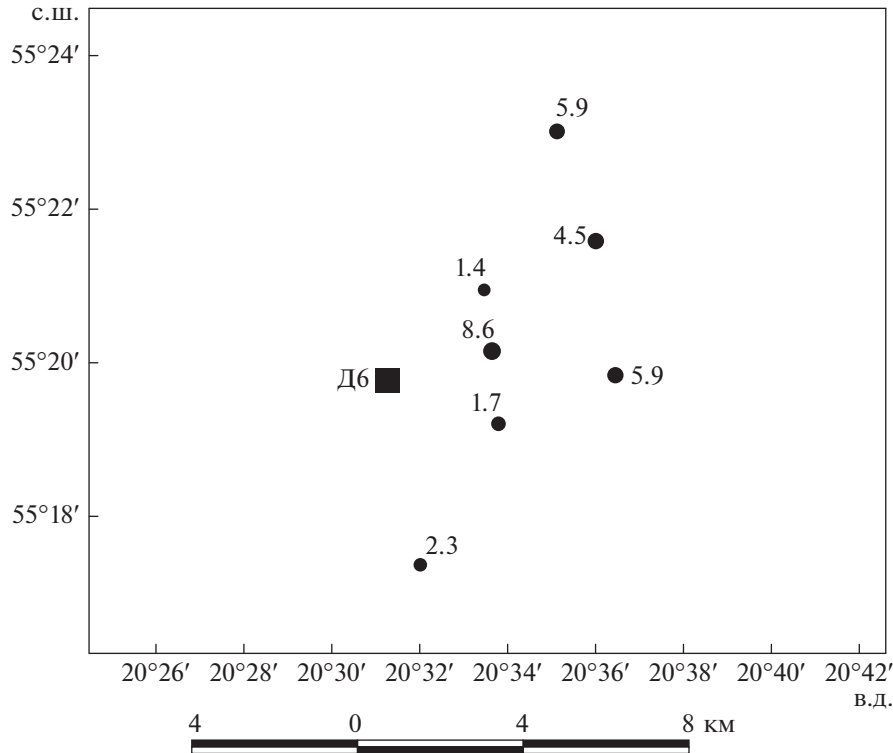


Рис. 7. Эпицентры землетрясений (диапазон магнитуд $M_L = 2.5–3$), произошедших в мае 2008 г. в районе платформы Д6, с указанием глубины очага в километрах по данным сейсмостанций ИО РАН.

Разность вступлений продольных P - и поперечных S -волн на всех сейсмограммах (рис. 8) практически одинаковая и составляет 2.0–2.3 с. Это дает возможность оценить гипоцентрально расстояние от донного сейсмографа (ДС-2, см. рис. 1) до очагов землетрясений. При условии, что величина скорости распространения фиктивных волн (волны $S-P$) в верхней слое осадков может находиться в пределах 5–6 км/с, получаем диапазон значений $d = 10–14$ км (расстояния, близкие к дистанции между донным сейсмографом и платформой Д6, см. рис. 1).

Из 12 характерных сейсмических сигналов, записанных донным сейсмографом ДС-2, наземными сейсмостанциями АСС-4 и АСС-5 было зарегистрировано только 7 из-за высокого уровня шумов экзогенной природы на суше и удаленности точек приема от источников сигнала (60–70 км). Сейсмограммы наиболее сильного землетрясения, произошедшего 16 июля в 15 ч 44 мин (Калининградское время), имевшего магнитуду $M_L = 3.3$ и отмеченного всеми сейсмографами ИО РАН, представлены на рис. 9. Сейсмостанциями Швеции и Норвегии эти землетрясения зарегистрированы не были.

Наиболее “выразительная” запись получена гидрофоном и вертикальным сейсмоприемником Z донного сейсмографа ДС-2 (верхняя сейсмо-

грамма на рис. 9). На этих каналах сейсмический сигнал имеет классическую форму морского землетрясения. Наблюдаются четкие вступления продольных (P) и поперечных (S) волн, причем амплитуда поперечной волны более чем в 5 раз превышает амплитуду продольной волны. На записях присутствует акустическая T -фаза, характерная для событий в акваториях, которая может конвертироваться обратно в сейсмические волны, когда достигает побережья. На горизонтальных каналах X и Y (верхняя сейсмограмма на рис. 9) вступления продольных и поперечных волн гораздо менее четкие, и отношение амплитуды волн S к амплитуде волн P не превышает 3. Это может свидетельствовать о том, что данное землетрясение может иметь техногенную природу. Согласно работе [Асминг и др., 2010] отношение амплитуд поперечных и продольных волн $S/P > 3$ свидетельствует в пользу того, что событие является тектоническим землетрясением, хотя при этом отмечают, что этот критерий не является абсолютно достоверным.

Кроме того, на техногенный характер обнаруженных сейсмических событий указывают небольшие глубины их очагов (первые километры).

Изменения пластового давления в области нефтеносного пласта, происходящие в процессе откачки углеводородов и закачки воды, не могут

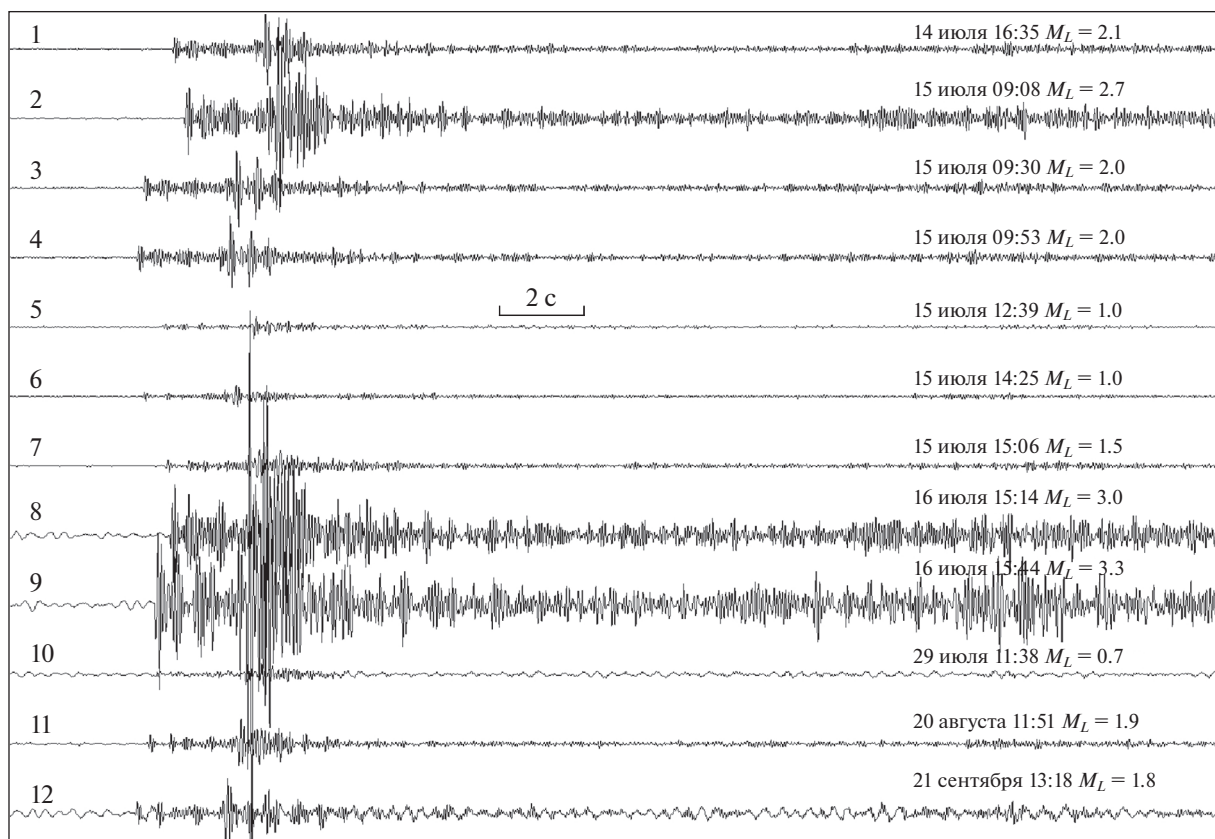


Рис. 8. Сигналы землетрясений из района Кравцовского месторождения, зарегистрированные донным сейсмографом ДС-2 (гидрофонный канал) в 2009 г.

приводить к значительному росту касательных напряжений в твердой среде, поэтому, специфика поперечных волн от зарегистрированных землетрясений может свидетельствовать об их техногенной природе. На это же указывает малая глубина очагов этих сейсмических событий.

Отношение сигнал/шум для сигнала землетрясения, произошедшего 16 июля в 15 ч 44 мин 2009 г., на сейсмограммах наземных станций АСС-4 и АСС-5 существенно меньше отношения сигнал/шум на записях донного сейсмографа ДС-2 (см. нижнюю и среднюю сейсмограммы на рис. 9). Это можно объяснить большими эпицентрными расстояниями до наземных станций по сравнению с расстоянием до донного сейсмографа ($\Delta \sim 60\text{--}70$ км для станций АСС-4, 5 и $\Delta \sim 10\text{--}14$ км для станции ДС-2) и более высоким уровнем фонового сейсмического шума на суше. Причем в точке установки АСС-4 фоновый шум выше, чем в точке установки АСС-5, это видно при сравнении нижней и средней сейсмограмм на рис. 9.

На этих же сейсмограммах видно, что вступления поперечных волн на записях наземных сейсмографов маловыразительны.

В процессе обработки были построены амплитудные спектры всех 12 характерных сейсмических сигналов возможной техногенной природы (сейсмограммы см. на рис. 8). Эти спектры представлены на рис. 10, причем номера кривых, показанных на рис. 8, совпадают с номерами спектральных кривых, представленных на рис. 10. В данном случае использовались записи гидрофонного канала донного сейсмографа.

Из рис. 10 видно, что спектральные кривые техногенных землетрясений имеют ряд особенностей.

1. Спектральный состав этих землетрясений находится в относительно узкой полосе частот — 8–16 Гц алогично импульсным сейсмическим сигналам, регистрируемым при разработке угольных месторождений [Опарин и др., 2009].

2. Зависимость спектрального состава и формы спектров сигналов возможно техногенных землетрясений от магнитуды сейсмического события не явная, если она не превышает величины $M_L = 3.0$. Все кривые на рис. 10 кроме графика № 9 имеют примерно одинаковую форму. Для более сильного землетрясения ($M_L = 3.3$, кривая № 9)

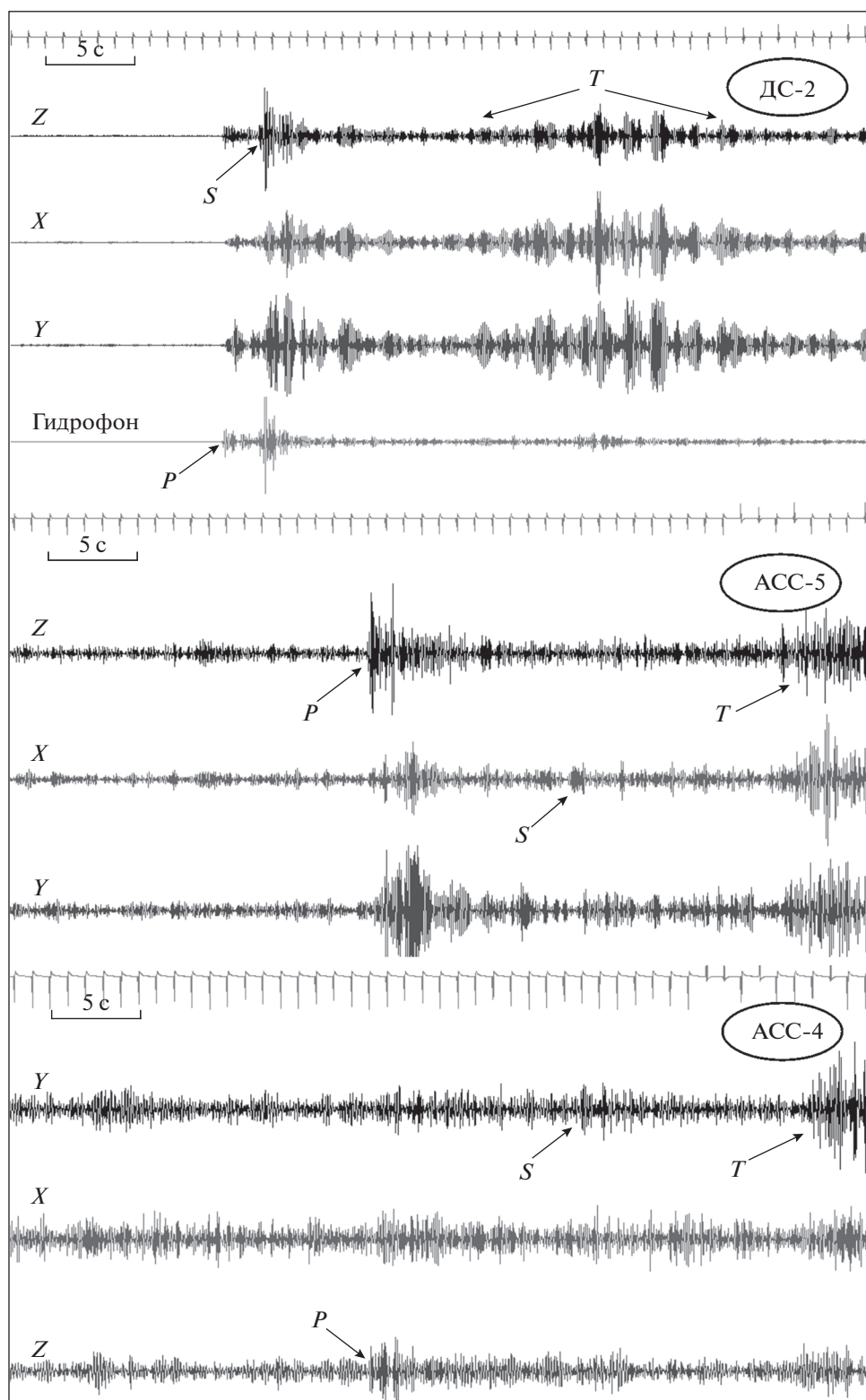


Рис. 9. Сейсмограммы землетрясения, произошедшего 16 июля в 15 ч 44 мин 2009 г. ($M_L = 3.3$), зарегистрированного сейсмографами ДС-2, АСС-5 и АСС-4; Z – вертикальный сейсмометрический канал; X и Y – горизонтальные сейсмометрические каналы; гидрофон – запись колебаний придонного давления.

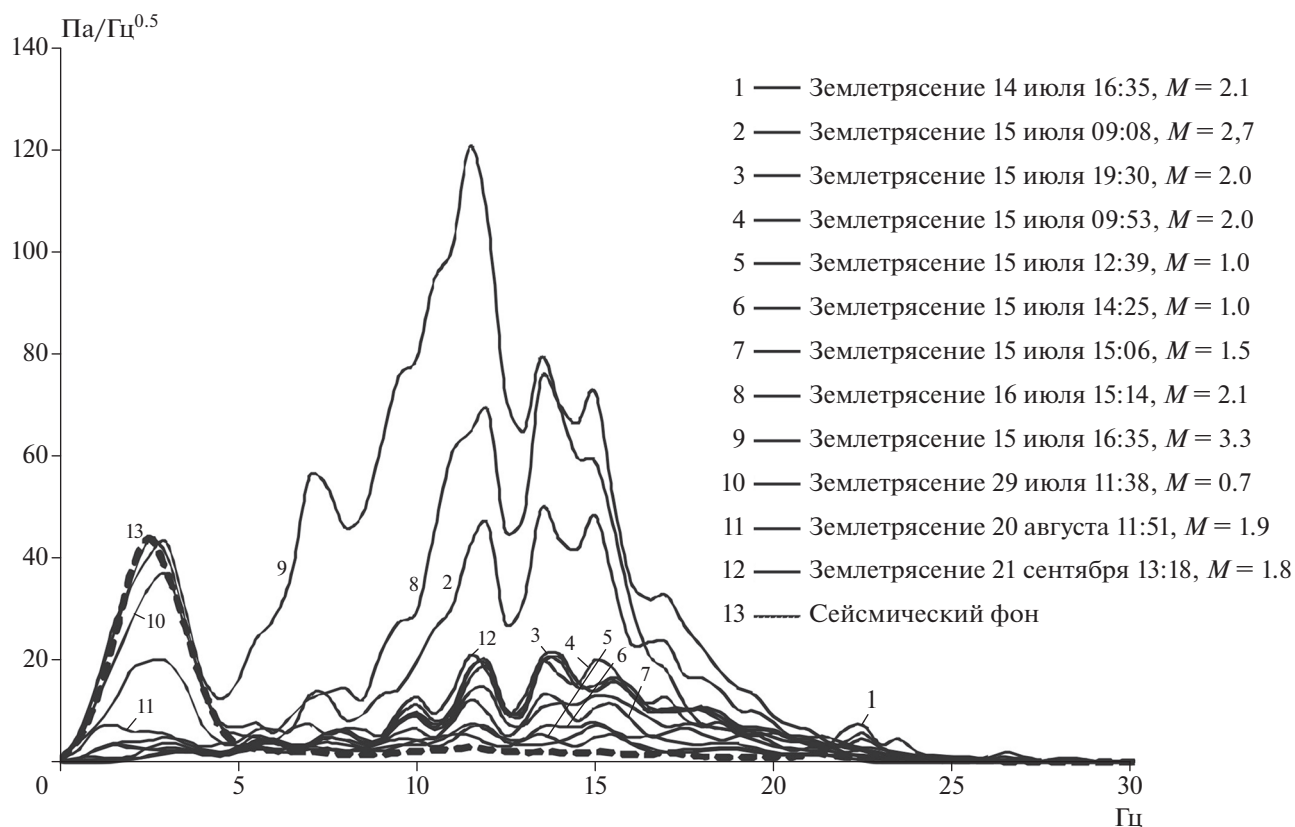


Рис. 10. Спектры техногенных землетрясений, происходящих в районе Кравцовского месторождения, зарегистрированных донным сейсмографом ДС-2 (гидрофонный канал).

наблюдается небольшое смещение спектра в сторону низких частот.

3. Основная спектральная компонента фонового шума на записях колебаний придонного давления приходится на частоту 2.5 Гц. Перед расчетами спектров записи были отфильтрованы с помощью полосового фильтра Баттерворта 4 порядка с полосой пропускания 5–25 Гц. Спектр шума (пунктирная кривая на рис. 10) имеет спектральный максимум на частотах 0.2–0.3 Гц. Вызванный, скорее всего, волнением моря.

Представляется интересным сделать сравнение спектральных кривых сигналов землетрясений предположительно техногенной и заведомо тектонической природы. С этой целью нами были выбраны записи сейсмических сигналов, полученные в районе центральной части Курильской островной дуги и в акватории Среднего Каспия. Выбранные сейсмические события близки по параметрам к балтийскому землетрясению, зарегистрированному 15 июля 09 ч 08 мин 2009 г. Магнитуда курильского землетрясения составляла $M_L = 2.8$, эпицентрального расстояние $\Delta = 3$ км, наклонная дальность (гипоцентрального расстояние d) приблизительно 10 км. Магнитуда каспийского землетрясения составляла $M_L = 2.8$, $\Delta = 13$ км,

$d = 15$ км. Магнитуда балтийского землетрясения составляла $M_L = 2.7$, $\Delta = 10$ км, $d = 12$ км.

Все эти сигналы были записаны однотипными донными сейсмографами, имеющими идентичные параметры гидрофонных каналов. Их сейсмограммы представлены на рис. 11, а спектры — на рис. 12а.

Судя по спектральным кривым, показанным на рис. 12а, спектральные составляющие балтийского землетрясения находятся в относительно узкой полосе частот 10–16 Гц в отличие от землетрясений явно тектонической природы (курильского и каспийского), для которых основная область спектра расположена в диапазоне 3–20 Гц. Резкий минимум спектральной кривой каспийского землетрясения на частоте порядка 12 Гц (штрихпунктирная кривая на рис. 12) можно объяснить местными грунтовыми условиями в точке приема сейсмических сигналов.

Возможно, что необычно узкая полоса частот, составляющих спектр балтийских землетрясений, указывает на их техногенное происхождение.

Опыт сейсмологического мониторинга разрабатываемых угольных месторождений показывает, что над областью обрабатываемого пласта ре-

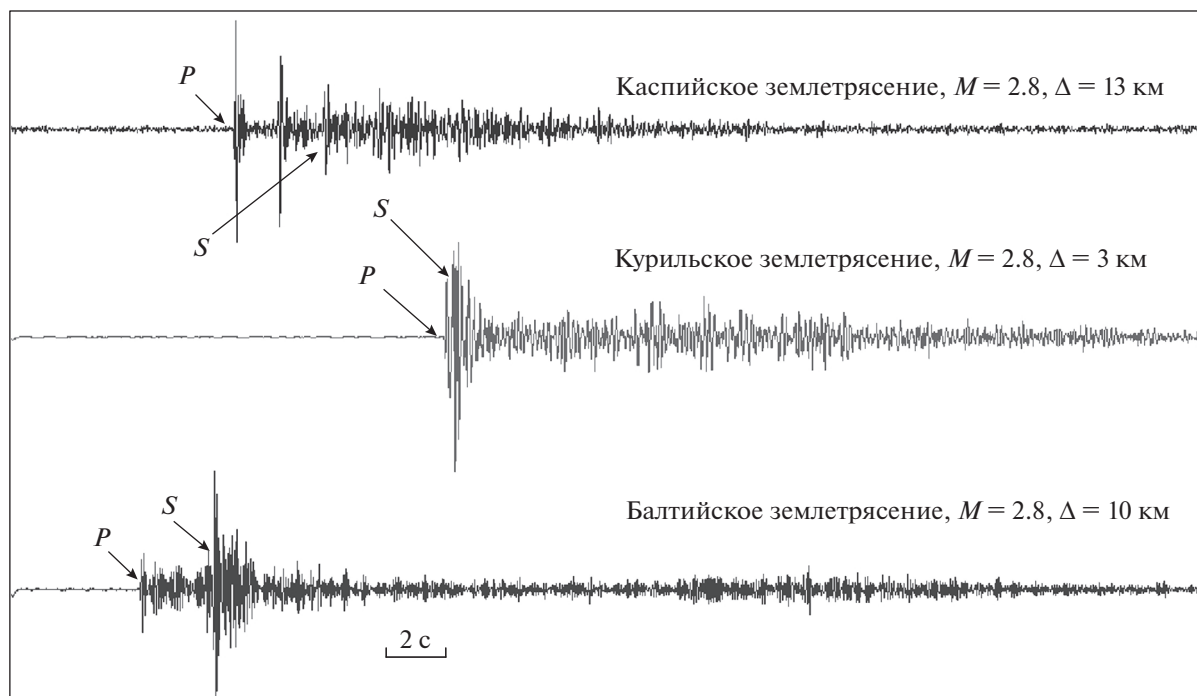


Рис. 11. Сейсмограммы землетрясений, зарегистрированных донными сейсмографами в различных акваториях (записи колебаний придонного давления, гидрофоны).

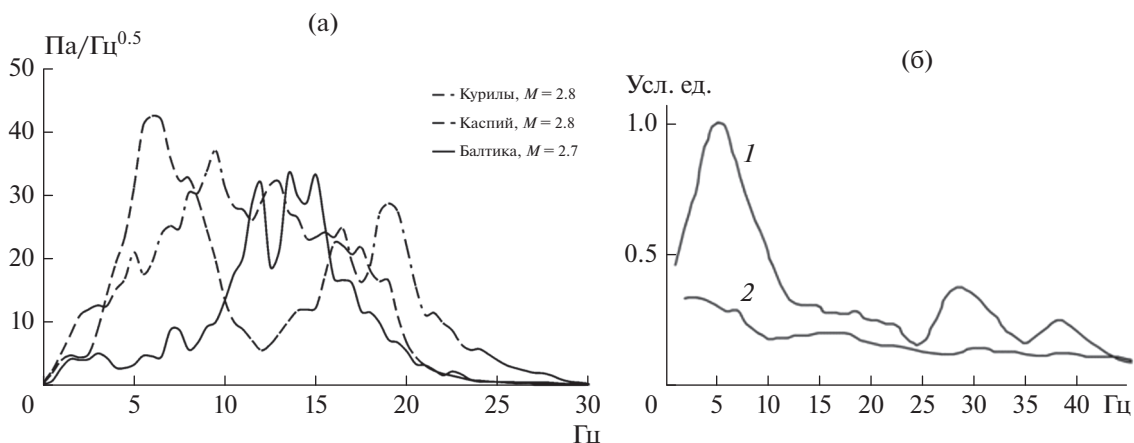


Рис. 12. (а) – Спектры сигналов землетрясений, представленных на рис. 11; (б) – обобщенные спектры низкочастотных сейсмических колебаний (1) и микросейсм (2) над областью обрабатываемого пласта из книги [Опарин и др., 2009].

гистрируются низкочастотные (как их называют авторы) сейсмические сигналы, имеющие достаточно узкополосный спектр, показанный на рис. 126 [Опарин и др., 2009].

Как уже отмечалось, из 12 зарегистрированных донным сейсмографом ДС-2 характерных сейсмических сигналов наземными сейсмическими станциями АСС-4 и АСС-5 были записаны только 7. Для этих землетрясений были рассчитаны

координаты эпицентров и глубины очагов. Они приводятся в табл. 6.

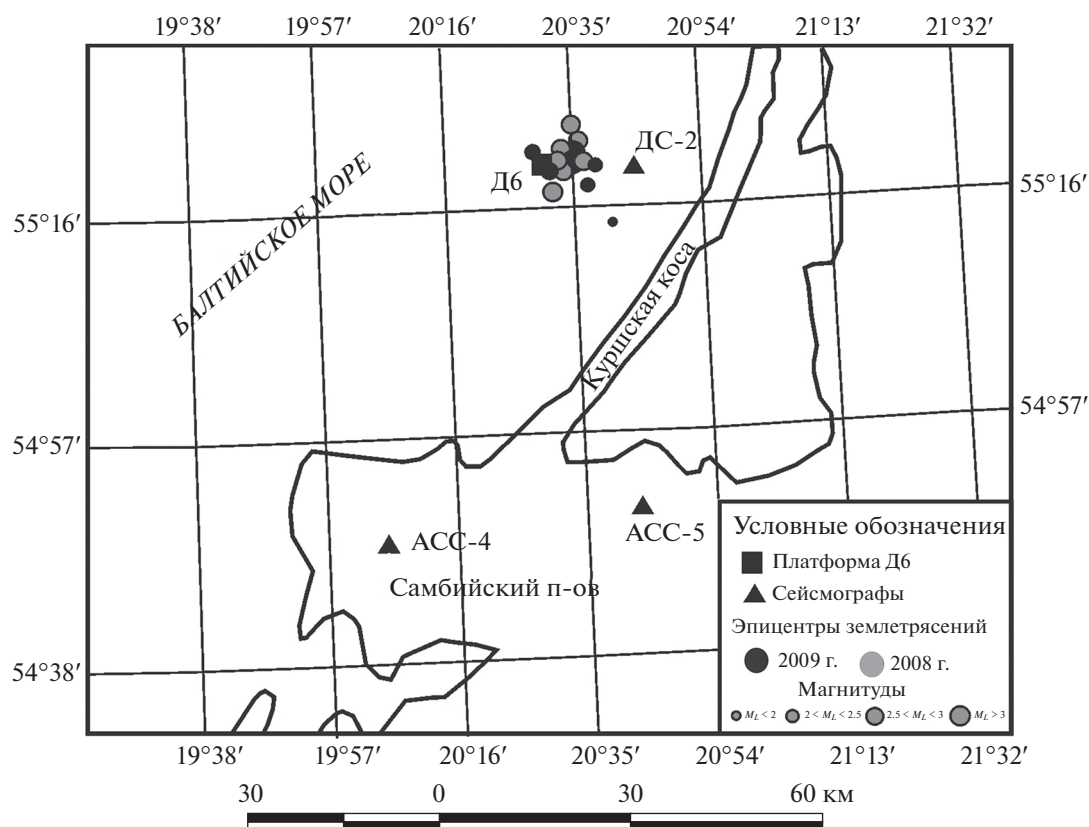
Все 7 локализованных эпицентров землетрясений даже с учетом ошибок попадают в район разработки Кравцовского месторождения (рис. 13), т.е. результаты сейсмологического мониторинга 2009 г. подтверждают информацию 2008 г. о наличии техногенной сейсмичности в районе Д6, представленную слабыми и микроземлетрясениями с магнитудами $M_L = 0.7-3.3$.

Таблица 6. Параметры очагов землетрясений в 2009 г. в Балтийском море по данным автономных сейсмических станций ИО РАН

| Дата Год-месяц-день | Время в очаге ч мин с | С. широта град.-мин | В. долгота град.-мин | Глубина очага, км | Магнитуда M_D | Эпицентральное расстояние в км | RMS с | Er.Z км | Er.H км |
|------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------------|----------|------------|------------|
| 2008-07-14 | 16 h 35 m 15.3 s | 55-20.85 | 20-29.35 | 4.51 | 2.01 | 16 | 0.12 | 1.18 | 0.95 |
| 2008-07-15 | 9 h 8 m 37.9 s | 55-19.5 | 20-31.75 | 8.6 | 2.03 | 13 | 0.12 | 1.27 | 1.02 |
| 2008-07-15 | 9 h 32 m 43.1 s | 55-19.52 | 20-38.56 | 5.85 | 2.00 | 6 | 0.07 | 0.18 | 0.1 |
| 2008-07-15 | 9 h 53 m 36.0 s | 55-17.86 | 20-37.19 | 5.89 | 1.91 | 8 | 0.11 | 0.28 | 0.21 |
| 2008-08-20 | 11 h 51 m 28.9 s | 55-14.65 | 20-40.73 | 2.31 | 1.87 | 10 | 0.09 | 3.67 | 3.99 |
| 2008-07-16 | 15 h 13 m 59.5 s | 55-19.81 | 20-34.89 | 1.73 | 2.04 | 10 | 0.09 | 0.58 | 0.36 |
| 2008-07-16 | 15 h 44 m 21.6 s | 55-20.77 | 20-35.28 | 1.35 | 2.00 | 10 | 0.09 | 0.73 | 0.42 |

Таким образом, в результате сейсмологического мониторинга Кравцовского месторождения, проводившегося ИО РАН в 2008–2009 гг. было установлено, что наличие эпицентров землетрясений в районе нефтедобычи на платформе Д6 весьма вероятно и требует к себе повышенного внимания, поскольку они могут иметь техногенную природу, связанную с интенсивной откачкой нефти. Этот фактор необходимо учитывать, оценивая сейсмическую опасность для западной части Калининградской области и примыкающей к ней акватории Балтийского моря.

Основываясь на приведенных выше данных, сделаем оценку параметров возможных сейсмических воздействий на конструкции платформы Д6. Выберем эпицентральное расстояние $\Delta = 0$, т.е. землетрясение с магнитудой $M_{LH} (M_S) = 5.0$ согласно работе [Уломов и др., 2008] может произойти непосредственно под платформой. За глубину очага h , по-видимому, необходимо принять среднюю глубину землетрясений предположительно техногенной природы, обнаруженных под платформой Д6, поскольку тектоническое землетрясение с параметрами из работы [Уломов и др.,

**Рис. 13.** Эпицентры землетрясений, предположительно техногенной природы, в районе платформы Д6 по результатам сейсмологического мониторинга в 2008 и 2009 гг.

2008] может быть спровоцировано техногенными землетрясениями, т.е. разрыв твердой среды может начаться на глубинах, где происходят техногенно-индуцированные землетрясения. Среднее значение глубин очагов землетрясений согласно данным сейсмологического мониторинга ИО РАН составляет $h = 4.3$ км.

Используя уравнение из работы [Гусев, Шумилина, 1999], описывающей затухание интенсивности сейсмических сотрясений I_{MSK} в баллах шкалы *MSK-64* от эпицентрального расстояния:

$$I_{MSK} = 1.5M_{LH} - 3.5 \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + 3.0, \quad (3)$$

где: $M_{LH}(M_S)$ – магнитуда землетрясения; h – глубина очага в км; Δ – эпицентрального расстояние в км, получаем $I_{MSK} = 8.3$ балла шкалы *MSK-64*.

ВЫВОДЫ

В настоящей статье была сделана попытка оценить сейсмическую опасность для объектов обустройства Кравцовского месторождения углеводородов с учетом обнаруженных в его пределах слабых землетрясений возможно техногенно-индуцированной природы.

В результате сейсмологического мониторинга, проводившегося силами ИО РАН на западе Калининградской области и в акватории Балтийского моря в районе Кравцовского месторождения с использованием высокочувствительных автономных донных и наземных сейсмографов, были обнаружены слабые землетрясения возможно техногенной природы с эпицентрами в районе морской платформы Дб. Учет влияния техногенной сейсмичности на степень сейсмической опасности региона может увеличить значение балльности максимально возможного сейсмического воздействия до величины 8.3, а, принимая во внимание, неблагоприятные грунтовые условия (рыхлые обводненные пески и супеси) – до величины 8.8 балла. Такие воздействия опасны для конструкций платформы и подводного нефтепровода и могут приводить к аварийным разливам нефти.

Необходимо отметить, что сделанные оценки являются предварительными. Для получения более достоверных параметров максимально возможных сейсмических воздействий на объекты обустройства Кравцовского месторождения необходимо выполнить целый комплекс работ.

Во-первых, необходимо продолжать наблюдения за естественной и техногенной сейсмичностью района Кравцовского месторождения с помощью автономных сейсмографов, переходя от эпизодических наблюдений к непрерывным. Кроме того, необходимо отметить, что использование для этого береговых сейсмографов малоэффективно из-за их удаленности от исследуемого

объекта и высокого уровня шумов эндогенной природы на суше. Береговые станции, расположенные на расстояниях более 60 км от Дб не в состоянии регистрировать землетрясения с магнитудой менее 2, происходящие в районе Кравцовского месторождения с приемлемым отношением сигнал/шум, что существенно влияет на точность определения координат эпицентров землетрясений и глубин очагов. Оптимальная сейсмическая сеть для мониторинга Кравцовского месторождения должна состоять, как минимум, из трех донных сейсмографов, установленных на расстоянии 5–10 км от платформы Дб.

В дальнейшем необходимо разместить постоянно действующую систему геодинамического мониторинга (СГДМ), состоящую из донных сейсмических станций, окружающих платформу Дб, информация с которых по донным кабельным линиям поступает в центр сбора, расположенный на платформе. Такая система разработана в ИО РАН и эксплуатируется на месторождении им. Ю. Корчагина (Северный Каспий) [Лобковский, Ковачев, 2010]. Или адаптировать для моря и установить в районе Кравцовского месторождения систему сейсмодетекторного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов, описанную в книге [Опарин и др., 2009].

Во-вторых, необходимо выполнить весь комплекс мероприятий по уточнению исходной сейсмичности (УИС), который должен включать: новые данные по разломной тектонике региона; уточнению параметров основных сеймотектонических зон района; уточнение параметров повторяемости землетрясений; уточнение моделей затухания интенсивности сейсмических сотрясений в земной коре и др.

В-третьих, необходимо выполнить сейсмическое микрорайонирование (СМР) площадки, на которой установлена платформа Дб, и трассы подводного нефтепровода для учета влияния свойств донного грунта на параметры сейсмических воздействий с использованием инструментальных методов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания № FMWE-2021-0004 (обзор тектонической и возможной техногенной сейсмичности Калининградского региона), при финансовой поддержке ООО “ЛУКОЙЛ-КМН” (проведение морских экспедиционных работ по установке и подъему донных сейсмостанций, обработка сейсмических записей) и гранта № МК-45.2022.1.5 Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (анализ возможной техногенной природы зарегистрированных микроземлетря-

сений в контексте оценки эндогенных геологических опасностей для объектов нефтегазодобычи в море).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В.* Сильные природно-техногенные землетрясения как особый вид триггерной. Материалы второго Всероссийского семинара-совещания / В.В. Адушкин и Г.Г. Кочарян (ред.). Триггерные эффекты в геосистемах. 2013. М.: ГЕОС. С. 10–33.
- Адушкин В.В., Турунтаев А.Б.* Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). 2005. М.: ИНЭК. 252 с.
- Асминг В.Э., Кременецкая Е.О., Виноградов Ю.А., Евтюгина З.А. Использование критериев идентификации взрывов и землетрясений для уточнения оценки сейсмической опасности региона // Вестник МГТУ. 2010. Т. 13. №4/2. С. 998–1007.
- Ассиновская Б.А., Овсов М.К.* Сейсмотектоническая позиция Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 года // Физика Земли. 2008. № 9. С. 32–43.
- Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н.* Особенности геологического строения и разработки нефтяного месторождения “Уилмигтон” в Калифорнии // Бурение и нефть. 2016. № 9. С. 22–27.
- Борисов А.С.* Широкополосные гидроакустические наблюдения сигналов микросейсмической активности южных Курильских островов в 2011–2012 гг. Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. Материалы IV Всероссийской научной конференции. Муромский институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых”. 2013. С. 34–38.
- Гусев А.А., Шумилина Л.С.* Моделирование связи балл-магнитуда-расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 29–40.
- Ковачев С.А.* Результаты сейсмологических наблюдений на западе Калининградской области и на акватории Балтийского моря // Физика Земли. 2008. № 9. С. 20–31.
- Кузьмин Ю.О.* Индуцированные сейсмические процессы на месторождениях нефти и газа // Проблемы нефтепользования. 2019. № 4. С. 9–17. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.04.009>
- Левин Б.В., Сасорова Е.В., Борисов С.А., Борисов А.С.* Оценка параметров слабых землетрясений и их сигналов // Вулканология и сейсмология. 2010. № 3 С. 60–70.
- Лобковский Л.И., Ковачев С.А.* Система геодинамического мониторинга нефтегазодобычи на шельфе на примере морского нефтегазового месторождения имени Ю. Корчагина // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 11. С. 11–14.
- Мельников Н.Н., Калашник А.И.* Геодинамические риски освоения нефтегазовых месторождений Баренцрегиона и трубопроводного транспортирования углеводородного сырья // МурманшельфИнфо. 2008. Изд-во ООО “Ресурсный центр”. № 4. С. 13–17.
- Никонов А.А.* По следам Калининградского землетрясения // Природа. 2005. № 3. С. 47–53.
- Опарин В.Н. и др.* Методы и системы сейсмодеоформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 1. / Н. Н. Мельников (ред.). Новосибирск: СО РАН. 2009. 304 с.
- ОСР-97. Сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Карта М: 1800000. Карта М: 1800000. 2000 / В.Н. Страхов, В.И. Уломов (ред.). М.: ОИФЗ РАН. Роскартография. 4 л.
- Островский А. А.* Донные сейсмоэксперименты. М.: Наука. 1998. 254 с.
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Горбатилов А.В., Лутиков А.И.* Оценка сейсмической опасности г. Калининград в детальном масштабе // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2014. № 4. С. 19–27.
- Родкин М.В., Рукавишников Т.А.* Вызванная сейсмичность: серьезная угроза добычи сланцевой нефти? // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. № 3(22). С. 1–11. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art39>. <http://oilgasjournal.ru>
- Соловьев С.Л., Ковачев С.А.* Определение магнитуд микроземлетрясений по донным сейсмологическим наблюдениям // Физика Земли. Т. 32. № 5. 1996. С. 26–30.
- Соловьев, С.Л. Ковачев С.А., Кузин И.П., Воронина Е.В.* Микросейсмичность Эгейского и Тирренского морей по наблюдениям донных сейсмографов. М.: Наука. 1993. 160 с.
- СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* (с Изменением № 1). ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. 2018. <https://docs.cntd.ru/document/550565571>
- Уломов В.И., Акатова К.Н., Медведева Н.С.* К оценке сейсмической опасности в Калининградской области // Физика Земли. 2008. № 9. С. 3–19.
- Уломов В.И., Богданов М.И., Трифионов В.Г. и др.* Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплексу карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах. 2016. ИФЗ РАН. http://seismos-u.ifz.ru/documents/zapiska_OCR_2016.pdf
- Gregersen S. et al.* The exceptional earthquakes in Kaliningrad district, Russia 24 September 21, 2004 // Physics of the Earth and Planetary interiors. 2007. № 164. P. 63–74.
- Lee W.H.K., Lahr J.C.* HYPO-71 (Revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquake. 1985. US. Wash (D.C.) Geol. Serv. (Open-file rep. 75-311). 114 p.
- Mavko, G. M.; Schulz, S.; Brown, B. D.* Effects of the 1983 Coalinga, California, Earthquake on creep along the San Andreas fault // Bulletin of the Seismological Society of America. 1983. №75 (2). P. 475–489.
- Sasorova E. V., Levin B. W., Morozov V. E.* Hydro-seismic-acoustical monitoring of submarine earthquakes preparation: observations and analysis // Adv. Geosci. 2008 № 14. P. 99–104. www.adv-geosci.net/14/99/2008/

Results of Seismological Monitoring in the Baltic Sea and Western Part of the Kaliningrad Oblast Using Bottom Seismographs

S. A. Kovachev^{a, *} and A. A. Krylov^a

^a*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

^{*}*E-mail: kovachev@ocean.ru*

In 2007–2015, Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (IO RAS) carried out seismological observations in the water area and on the coast of the Baltic Sea using autonomous seismic stations. Here, in the area of the Sambia Peninsula, previously considered aseismic, a strong perceptible earthquake with a magnitude of about $M = 4.6$ occurred in 2004. The most interesting data were obtained by IO RAS in 2008–2009 from seismological monitoring using autonomous bottom and coastal seismic stations. The data obtained in 2010–2015 turned out to be unsuitable for full-scope processing due to several causes (losses of bottom seismographs, high noise level at coastal stations, etc.). Seismological monitoring in the west of the Kaliningrad region and in the adjoining area of the Baltic Sea detected weak earthquakes with magnitudes $M_L = 2.5-3$ whose sources are confined to the development area of the Kravtsovskoe offshore oil field. Some of these earthquakes have been recorded by the stations of the Norwegian seismic array NORSAR and by the seismic stations of Sweden. The Kravtsovskoe oil field is located on the shelf northwest of the unique natural object, the Curonian Spit. The detected weak earthquakes are likely to be anthropogenic, induced by reservoir pressure disturbances as a result of intensive hydrocarbon production, and are probably precursors of a strong man-made earthquake.

Keywords: Baltic Sea, seismic hazard, seismological monitoring, ocean-bottom seismograph, man-made earthquake