УДК 550.34(571.642)

ПИЛЬТУНСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 12 ИЮНЯ 2005 Г. (Mw = 5.6) И СОВРЕМЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ В РАЙОНЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ШЕЛЬФА 0. САХАЛИН

А.В. Коновалов¹, В.Н. Патрикеев¹, Д.А. Сафонов^{1,2}, Т.В. Нагорных¹, Е.П. Семенова^{1,2}, А.А. Степнов¹

¹ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 1Б, г. Южно-Сахалинск, 693022; e-mail: <u>konovalov@imgg.ru</u>

² Сахалинский филиал Геофизической службы РАН, ул. Тихоокеанская 2А, г. Южно-Сахалинск, 693010; e-mail: <u>safonov@imgg.ru</u>

Поступила в редакцию 17 февраля 2014 г.

12 июня 2005 г. в 4 ч. 17 мин. всемирного времени на северо-востоке о. Сахалин в окрестностях шельфового месторождения нефти и газа Пильтун-Астохское, промышленное освоение которого ведется с 1999 г., произошло сильнейшее в этом районе землетрясение с моментной магнитудой Mw = 5.6. Авторами собраны и проанализированы все имеющиеся инструментальные данные для построения объективной модели очага. Проанализирована современная сейсмичность региона по результатам детальных сейсмологических наблюдений. Полученные результаты сопоставлены с новыми данными о геолого-тектонической обстановке исследуемого района. Результаты данной работы дают основу для поиска объективных критериев распознавания естественной и триггерной сейсмичности в тектонически активных регионах, в том числе в районе нефтегазовых месторождений северо-восточного шельфа о. Сахалин, и выявления физических механизмов, приводящих к подобным явлениям.

Ключевые слова: наведенная сейсмичность, месторождение нефти и газа, сейсмотектоника, сейсмический режим, о. Сахалин.

введение

12 июня 2005 г. на северо-восточном шельфе о. Сахалин произошло коровое землетрясение с моментной магнитудой Mw = 5.6. Так как ближайший населенный пункт, в котором отмечены максимальные сотрясения (4-5 баллов по шкале MSK-64), п. Пильтун, то предложено данное событие называть Пильтунским. Несколько землетрясений, магнитуда которых близка к М ~ 5.5, ранее уже были зарегистрированы на северо-восточном шельфе (восточнее от п-ва Шмидта). Возникновение этих событий обычно связывали с современной тектонической активностью западного борта впадины Дерюгина. Пильтунское землетрясение 2005 г. представляет особый интерес, так как оно произошло значительно южнее упомянутых событий и на текущий момент является самым сильным в этой шельфовой зоне острова за всю историю сейсмологических наблюдений (с 1905 г. по настоящее время).

С конца 2006 г. на севере о. Сахалин проводятся детальные сейсмологические наблюдения с целью изучения динамики сейсмического режима и своевременного выявления сейсмической активизации, которая может наступить в результате многолетнего промышленного освоения нефтегазовых месторождений в северо-восточной шельфовой зоне острова. К настоящему времени накоплен и обработан огромный архив инструментальных данных, подготовлен рабочий вариант каталога землетрясений, что позволило детально проанализировать современную сейсмичность исследуемого района.

ПАРАМЕТРЫ ГИПОЦЕНТРА

Сейсмическое событие 12 июня 2005 г. было уверенно зарегистрировано многими региональными сейсмическими станциями СФ ГС РАН, а также телесейсмическими станциями Объединенного института сейсмологических исследований (IRIS – Incorporated Research Institutions for Seismology) [33] и широкополосными станциями японского Национального исследовательского института наук о Земле и предотвращения катастрофических явлений (NIED – National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention) [31]. Были собраны и проанализированы все имеющиеся инструментальные и макросейсмические данные для построения объективной модели очага землетрясения. В таблице 1 приведены очаговые параметры (время в очаге, координаты эпицентра, глубина очага и магнитуда) Пильтунского землетрясения 2005 г. по данным региональных и зарубежных сейсмологических агентств, а также определенные в настоящей работе.

Эпицентр землетрясения был локализован по методу инверсии времен пробега сейсмических волн (программа Hypocenter [18]) с использованием как средней модели строения Земли IASP91, так и локального сейсмического разреза [7]. Последний применяется для локализации гипоцентров землетрясений в ходе детальных сейсмологических наблюдений на севере о. Сахалин.

В первом случае привлекались данные разных типов сейсмических волн с четырех близких региональных станций, расположенных на севере о. Сахалин (OKHA, TYV, UGL) и материковой части Дальневосточного региона (NKL). Использовался только локальный сейсмический разрез. Глубина очага и эпицентр землетрясения были оценены одновременно. Для корректировки отношения скоростей *P*- и *S*-волн и независимой оценки времени в очаге производилось дополнительное тестирование измеренных параметров при помощи графика Вадати. Начальное положение очага задавалось исходя из априорных знаний о произошедшем землетрясении. В совокупности это позволило добиться высокой точности пространственной привязки очага землетрясения, несмотря на небольшое количество исходных данных. Координаты эпицентра составили 52.80° с.ш., 144.07° в.д. (табл. 1, № 6). Погрешности определений координат эпицентра в виде эллипса ошибок представлены на рис. 1. Таким образом, определение координат эпицентра Пильтунского землетрясения 2005 г. в программе Нуросепtег с использованием локального сейсмического разреза позволяет корректно сравнивать полученные оценки с результатами детальных сейсмологических наблюдений, проводимых на севере о. Сахалин с 2006 г. в рамках единой системы наблюдений.

Во втором случае привлекались данные 25 региональных и телесейсмических станций (27 сейсмических фаз) с одновременным использованием средней модели строения Земли IASP91 и локального сейсмического разреза. Глубина очага фиксировалась (h = 14 км).

Региональный каталог землетрясений о. Сахалин за 1905–2005 гг. [12] является результатом кропотливой работы с сейсмологическим материалом специалистов из СФ ГС РАН и ИМГиГ ДВО РАН. В нем опубликованы параметры землетрясений, полученные по комплексу программ МГП (магнитуда, глубина, положение эпицентра [10]) – базового для СФ ГС РАН. Для землетрясений во второй половине 2005 г. параметры, вошедшие в региональный каталог [12], определялись во многом оперативно и в условиях дефицита исходной информации, поэтому расхождения этих решений (в основном в пределах точности локализации) с данными других источников являются закономерными, но не критичными. На взгляд авторов, для анализа очаговых параметров Пильтунского землетрясения 2005 г.,

Таблица 1. Очаговые параметры Пильтунского землетрясения 2005 г.

| № | Истонные | Время в очаге t_0 , | Эпицентр | | Глубина | Monumero |
|---|-------------------------|-----------------------|----------|-----------------------|---------|---------------|
| | ИСТОЧНИК | ч:мин:с | φ°с.ш. | 'с.ш. λ° в.д. очага h | | магнитуда |
| 1 | Рег. каталог, 2006 [11] | 04:17:10.3 | 52.78 | 143.74 | 14* | MLH = 5.7 |
| 2 | ССД ГС РАН | 04:17:11.1 | 52.79 | 143.97 | 10 | mb = 6.1 |
| 3 | NEIC USGS | 04:17:13.5 | 52.79 | 143.87 | 10 | $M_{W} = 5.6$ |
| 4 | GCMT | 04:17:13.5 | 52.85 | 143.92 | 15 | $M_{W} = 5.5$ |
| 5 | BJI | 04:17:12.4 | 52.65 | 143.85 | 14 | mb = 5.4 |
| 6 | ИМГиГ ДВО РАН, | 04:17:10.1 | 52.80 | 144.07 | 15 | |
| | наст. работа | (04:17:13.9) | (52.77) | (143.96) | (14)* | |
| 7 | СФ ГС РАН [3] | 04:17:08.1 | 52.86 | 144.18 | 14* | MLH=5.5 |

Примечание. MLH – магнитуда по поверхностной волне Релея, mb – магнитуда по объемной волне Р, Мw – моментная магнитуда; ССД ГС РАН – Служба срочных донесений Геофизической службы РАН, Обнинск, Россия; NEIC USGS – National Earthquake Information Center, United States Geological Survey, США; GCMT – The Global Centroid-Moment-Tensor Project; BJI – China Earthquake Networks Center, Institute of Geophysics, Китай; ИМГиГ ДВО РАН – Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия; СФ ГС РАН – Сахалинский филиал Геофизической службы РАН, Южно-Сахалинск, Россия; () – результаты определений по методу гипоинверсии с одновременным использованием средней модели строения Земли IASP91 и локального сейсмического разреза; * – фиксированное значение.



Рис. 1. Карта аномального магнитного поля и основных структурных элементов северо-восточного шельфа о. Сахалин.

 1 – эллипсы ошибок в определении координат эпицентров землетрясений 2006–2011 гг. (90 % доверительная область);
2 – эллипс ошибок в определении координат эпицентра Пильтунского землетрясения 2005 г. (90 % доверительная область);
3 – месторождения нефти и газа; 4 – антиклинальные поднятиявдоль Восточно-Одоптинской антиклинальной зоны; 5 – разломы: 1 – Западно-Одоптинский, 2 – Восточно-Сахалинский; 6 – изодинамы. полученных по материалам региональных наблюдений, более корректно использовать данные из опубликованного в 2011 г. каталога землетрясений о. Сахалин за 2005 г. (табл. 1, № 7) [5].

Таким образом, результаты определения координат эпицентра Пильтунского землетрясения 2005 г. совпали между собой в пределах точности локализации, а также и с результатами определений региональных и международных сейсмологических агентств (табл. 1).

Глубина очага исследуемого землетрясения была определена по фазам pP и sP, отраженным от свободной поверхности вблизи эпицентра, с использованием таблиц Л.Н. Поплавской для эпицентральных расстояний $\Delta \approx 1-14^{\circ}$ [11] и H.B. Кондорской – для $\Delta \ge 15^{\circ}$ [14] и в среднем составила $h = 14 \pm 3$ км. Всего было выбрано 23 глубинные фазы (табл. 2).

Независимая проверка полученного результата была выполнена с использованием методики многоканального кепстрального анализа для автоматизированного выделения сейсмических фаз *pP* в условиях зашумленной записи [6]. Метод использует кепстральный анализ для выделения эхоимпульсов на сейсмограмме опорной станции, а затем накопление индивидуальных кепстров по группе близко расположенных станций с последующей статистической оценкой значимости выделяемых эхосигналов. На рис. 2 представлен результат такой комплексной обработки по группе станций на юге о. Сахалин. На нем можно четко обозначить пик, соответствующий 4.5 ± 0.2 с и превышающий 99.9 % уровень значимости. Это время соответствует разности времен пробега Р- и рР-фаз. Отношение сигналшум достаточно хорошее. Как видно из табл. 2, разность времен пробега *P*- и *pP*-фаз, «прочитанная» по сейсмограммам цифровых сейсмических станций на юге острова, хорошо совпадает с результатом автоматизированной оценки, что подтверждает высокую точность определения глубины очага.

Глубина гипоцентра, оцененная в программе Нуросепtег с использованием локального сейсмического разреза, составила 15 км (табл. 1, № 6). Схожие результаты были получены международными сейсмологическими агентствами (табл. 1). Таким образом, мы можем уверенно заключить, что очаг Пильтунского землетрясения 2005 г. залегает в земной коре на глубине 10–15 км.

МЕХАНИЗМ ОЧАГА

Механизм очага исследуемого землетрясения был определен при помощи программы FOCMEC

| Станция, | • • | <i>i</i> - <i>P</i> , | hpP-P, | hsP-P, | Станция, | • • | <i>i</i> - <i>P</i> , | hpP-P, | hsP-P, |
|----------|------|-----------------------|--------|--------|----------|------|-----------------------|--------|--------|
| код | Δ, - | c | КМ | КМ | код | Δ, - | c | КМ | КМ |
| OKH | 1.0 | 4.2 | 12 | | EVMD | 6.5 | 4.5 | 12 | |
| OSM* | 5.6 | 4.6 | 12 | | EKIVIK | 0.5 | 7.8 | | 17 |
| KRS* | 6.2 | 5.0 | 15 | | YUK | 8.9 | 6.5 | | 13 |
| OJD* | 5.8 | 5.2 | 15 | | YASR | 9.5 | 6.1 | | 14 |
| MLK* | 6.0 | 5.4 | 16 | | ZEA | 9.9 | 5.7 | | 15 |
| LSN* | 6.1 | 4.2 | 11 | | NKL | 1.9 | 4.0 | 10 | |
| KLN* | 6.0 | 4.9 | 15 | | | | 8.0 | | 20 |
| YBL* | 5.7 | 4.0 | 10 | | YSS | 5.9 | 4.4 | 12 | |
| TYV | 2.0 | 4.3 | 11 | | | | | | 18 |
| | | 7.8 | | 13 | SKR | 7.9 | 4.5 | 14 | |
| UGL | 3.8 | 5.0 | 15 | | BMKR | 9.0 | 6.7 | | 13 |
| | | 7.5 | | 16 | | | | | |
| GRNR | 5.0 | 4.0 | 10 | | | | | | |

Таблица 2. Определение глубины очага Пильтунского землетрясения 2005 г. по глубинным фазам.

Примечание. * - автономные цифровые сейсмические станции СФ ГС РАН на юге о. Сахалин.



Рис. 2. Результат автоматизированного выделения глубинной *pP*-фазы относительно времени вступления *P*-волны по записям локальной группы автономных цифровых сейсмических станций на юге о. Сахалин.

1 – 99.9 % уровень значимости, 2 – обработанный кепстр.

(рис. 3а) [13, 27], интегрированной в комплекс сейсмологических программ SEISAN [24]. Оно взято за основу для последующего анализа.

В расчетах использовались инструментальные данные региональной сети сейсмических станций СФ ГС РАН, глобальной сейсмографической сети станций IRIS и японской широкополосной сети станций NIED. Всего выбрано 26 знаков четких вступлений первых движений Р-волны, зарегистрированных на вертикальной компоненте записей сейсмических колебаний. Для расчета углов выхода сейсмических волн из очага использовались средняя модель строения Земли IASP91 и локальный сейсмический разрез. При шаге поиска по сетке 5 градусов по расчетам выделено 12 возможных непротиворечивых вариантов решения механизма очага. Оценки рассеяния в ориентации осей главных действующих напряжений Т. Р и N для найденных решений составили в среднем ± 10 градусов. Параметры найденного решения приведены в таблице 3 (№ 3).

Независимое определение механизма очага Пильтунского землетрясения 2005 г. выполнялось с использованием базовых алгоритмов программы «МЕХ» [10]. В качестве исходной информации послужили сведения о знаках движений в волнах Pn, P^* , Pg, P и pP. Для уточнения полученного решения привлекались знаки в волнах S (Sn, S^* и Sg). Полученное решение механизма очага представлено на рис. Зб (табл. 3, № 3).

Похожее решение было получено в рамках проекта Global Centroid-Moment-Tensor (GCMT). GCMT [32] публикует тензор сейсмического момента очага землетрясения, полученный методом инверсии волновых форм, и является продолжением Гарвардского каталога механизмов. В рамках данной методики представленное решение является средним механизмом за время вспарывания разрыва (то же относится и к глубине).

Отметим небольшое отличие полученного решения при сравнении с данными агентства NEIC USGS (табл. 3, № 1). Однако сравниваемые механизмы можно считать идентичными по типу сейсмодислокации и ориентации главных осей напряжений (табл. 3).

Таким образом, результаты определения механизма очага Пильтунского землетрясения 2005 г. в рамках различных методических и алгоритмических подходов позволяют дать сейсмотектоническую интерпретацию данного явления.

Очаг землетрясения характеризуется близгоризонтальным напряжением сжатия, ориентированного субширотно, что в целом хорошо согласуется с современными представлениями о характере деформирования Северного Сахалина [3], с типом подвижки – взбросо-сдвиг.



Рис. За. Решение механизма очага Пильтунского землетрясения 2005 г. в программе FOCMEC (в проекции на нижнюю полусферу).

о – станции с зарегистрированными волнами сжатия, Δ – станции с зарегистрированными волнами разряжения. На выносках обозначены коды станций с соответствующими полярностями относительно первых вступлений *P*-волны.

Рис. 36. Решение механизма очага Пильтунского землетрясения 2005 г. в проекции на верхнюю полусферу (программа «MEX»).

I-3 – нодальные линии P = 0, SV = 0 и SH = 0, соответственно; 4-5 – знаки первых движений в *P*-, *SV*- и *SH*-волнах: 4 – экспериментальные (пустой кружок соответствует волне, распространяющейся от очага вниз); 5 – теоретические; 6 – оси P, T, X, Y, Z; 7-8 – знаки первых движений в *P*-волне.

| | | | NP1 | | NP2 | | | |
|---|----------------|-------------|---------|----------|-------------|---------|----------|--|
| № | Источник | Простирание | Падение | Подвижка | Простирание | Падение | Подвижка | |
| | | Strike | Dip | Rake | Strike | Dip | Rake | |
| 1 | NEIC USGS | 256 | 15 | 152 | 13 | 82 | 74 | |
| 2 | GCMT | 151 | 32 | 53 | 13 | 65 | 110 | |
| 3 | ИМГиГ ДВО РАН, | 143 | 48 | 48 | 17 | 56 | 127 | |
| | наст. работа | (175) | (36) | (52) | (39) | (62) | (114) | |

Таблица 3. Параметры механизма очага Пильтунского землетрясения 2005 г.

Одна из возможных плоскостей разрыва (NP1) имеет юго-восточное простирание и падение на югозапад, при этом юго-западное крыло разрыва поднялось и сместилось к юго-востоку. Вторая возможная плоскость разрыва (NP2) имеет северо-восточное простирание с падением на юго-восток, при этом юго-восточное крыло разрыва поднялось и сместилось на югозапад. По обеим плоскостям произошла подвижка типа взброса с левосторонней (по NP1) или правосторонней (по NP2) сдвиговыми компонентами движения.

АФТЕРШОКИ И СОВРЕМЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

По результатам детальных сейсмологических наблюдений (рис. 1) и с учетом новых данных о региональной сейсмичности [5] установлено, что в афтершоковой зоне Пильтунского землетрясения с июня 2005 г. по июнь 2011 г. произошло всего три землетрясения с $M \ge 4.0$: 12 июня 2005 г. (M = 5.5, Mw = 5.6), 5 сентября 2005 г. (M = 4.0, mb = 4.1) и 22 августа 2009 г. (M = 5.0, mb = 4.8). Данный факт подтвержда-

ют независимые источники сейсмологической информации, например NEIC USGS [30].

Событие 5 сентября 2005 г., которое произошло спустя три месяца с момента возникновения главного события 12 июня 2005 г., можно уверенно отнести к афтершоку. Подобная картина наблюдалась во время развития афтершокового процесса в 2010-2013 гг. после Уангского землетрясения 16 марта 2010 г. (М = 5.7, Mw = 5.8) на северо-западе о. Сахалин [8], когда самое сильное повторное событие с локальной магнитудой M = 5.1 было зарегистрировано спустя четыре месяца. Еще одно сильное повторное событие (M = 5) в афтершоковой зоне Уангского землетрясения 2010 г. произошло 24 ноября 2013 г., т.е. спустя три с половиной года после главного события. Таким образом, событие 22 августа 2009 г. в окрестностях очаговой зоны Пильтунского землетрясения 2005 г. также укладывается в картину постсейсмического процесса на севере о. Сахалин, характеризующегося серией сильных повторных землетрясений.

Детальные сейсмологические наблюдения на севере о. Сахалин стали проводится с конца 2006 г. [7], почти через один год после возникновения Пильтунского землетрясения 2005 г., поэтому провести объективный анализ афтершокового режима не представляется возможным. Однако рассматривая совокупность землетрясений, произошедших в шельфовой зоне острова за последние несколько лет, можно изучить их общие особенности как проявления единого геологического процесса, в том числе связанного с возникновением Пильтунского землетрясения 2005 г. На рис. 4 изображена карта эпицентров местных землетрясений (420 событий) с локальной магнитудой М ≥ 2.0, зарегистрированных с сентября 2006 г. по июнь 2011 г.

В пределах северо-восточного шельфа с 52.5° по 55.0° с.ш., в зоне Восточно-Сахалинского глубинного разлома (немного восточнее осевой линии разлома, изображенной на рис. 4) вдоль простирания его основных структур локализованы очаги слабых и среднеумеренных землетрясений на глубине 10–20 км. Это подтверждает современную активность данной геологической структуры, протяженность которой составляет приблизительно 250–300 км.

СТРУКТУРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ШЕЛЬФА О. САХАЛИН

Рассматриваемое землетрясение 12 июня 2005 г. (Mw = 5.6) произошло у внешнего края восточного шельфа Северного Сахалина. Далее к востоку он сменяется Дерюгинской впадиной, относящейся к Охотоморской депрессии. В структурном отношении шельф представляет собой систему субмеридиональных чередующихся поднятий и впадин. Впадины практически полностью компенсированы осадконакоплением.

По материалам сейсмических исследований в направлении с запада на восток выделяются следую-



Рис. 4. Пространственное распределение эпицентров коровых землетрясений с М ≥ 2.0, произошедших в период с сентября 2006 г. по июнь 2011 г.

Список закартированных разломов [16]. 1 – Западно-Сахалинский; 2 – Центрально-Сахалинский; 3 – Западно-Энгизпальский; 4 – Гыргыланьинский; 5 – Срединно-Сахалинский; 6 – Верхне-Пильтунский; 7 – Хоккайдо-Сахалинский; 8 – Восточно-Сахалинский; 9 – Аукан-Лунский; 10 – Восточно-Байкальский; 11 – Лиманский; 12 – Западно-Шмидтовский.

щие основные структурные элементы: Пильтунская синклинальная зона, Одоптинская и Восточно-Одоптинская антиклинальные зоны. Мористее располагается Восточно-Сахалинский прогиб и его не компенсированная осадками часть – замкнутая батиальная впадина Дерюгина, или Дерюгинский осадочный бассейн [4]. Одоптинская и Восточно-Одоптинская антиклинальные зоны разделяются очень узким прогибом, который на большинстве сейсмических профилей практически не проявляется в рельефе фундамента и дна, а более уверенно прослеживается в морфологии отражающих горизонтов. Таким образом, по сейсмическим данным создается впечатление, что эти две структуры объединяются в одно антиклинальное поднятие со сходным характером деформаций позднемиоцен-плиоценового возраста. С западной стороны оно ограничено Западно-Одоптинским разломом, к которому примыкает Пильтунская синклинальная зона, где кровля фундамента погружается с 3 до 10 км. С востока это поднятие ограничено Восточно-Сахалинским разломом, к которому примыкает Восточно-Сахалинский прогиб, где фундамент погружается до 7-8 км. Исходя из структурных особенностей строения северо-восточного шельфа о. Сахалин можно предполагать, что наиболее крупные сейсмические события в этом районе должны происходить в Восточно-Сахалинской и Западно-Одоптинской разломных зонах. В связи с этим представляет интерес рассмотреть их строение.

Западно-Одоптинский разлом изучен слабо. Согласно классификации разломов о. Сахалин, предложенной В.В. Харахиновым [16], он относится к верхнекоровым листрическим разломам, субгоризонтальные поверхности которых подстилают верхнюю часть коры. Они распространены в аккреционных и присдвиговых системах в виде сбросов, ограничивающих крупные мегасинклинали и присдвиговые впадины. На карте разломной тектоники Северного Сахалина [16] данный разлом располагается в зоне перехода от Пильтунской мегасинклинали к Одоптинской антиклинальной зоне (рис. 1), где происходит подъем фундамента по крайней мере на 6 км. Однако на большинстве сейсмических разрезов в осадочном чехле этой зоны не наблюдается значительных дизъюктивных нарушений при огромных амплитудах четвертичных пликативных деформаций. Непротяженные дизъюктивные нарушения выделяются лишь в фундаменте вблизи свода Одоптинской антиклинали с обоих сторон от нее и представляют собой малоамплитудные сбросы, связанные с опусканием сводовой части этой антиклинали (рис. 5). Такие нарушения характерны для большинства сводов крупных антиклиналей и обусловлены деформациями растяжения при их изгибе.

Исходя из этого можно заключить, что Западно-Одоптинский разлом трассирует систему современных присводовых, преимущественно западного падения, нарушений Одоптинской антиклинальной зоны и с ним могут быть связаны верхнекоровые (до 7–9 км) землетрясения сбросового типа. В настоящий момент данная структура сейсмически менее активна, чем Восточно-Сахалинский разлом. Это подтверждает общая картина пространственного распределения современной сейсмичности на севере острова, представленная на рис. 4. Магнитуда немногочисленных землетрясений, зарегистрированных в этой зоне в 2006–2011 гг., составляет М ~ 2.0–3.0.

По материалам аэромагнитной съемки, а позднее морской магниторазведки, у края шельфа северо-восточного Сахалина выделена Восточно-Сахалинская магнитная аномалия (рис. 1), которая прослеживалась от Восточного хребта п-ова Шмидта в юг-юго-восточном направлении на расстояние более 300 км и в плане совпала с Восточно-Одоптинской антиклинальной зоной. Таким образом, произошло обособление этой зоны и с ней стали связывать насыщенный телами ультрабазитов Восточно-Сахалинский глубинный разлом восточного падения [9]. В пределах п-ова Шмид-



Отношение вертикального масштаба к горизонтальному 1 : 2

Рис. 5. Сейсмический разрез, иллюстрирующий сброс в сдвиговой части Одоптинской антиклинальной зоны.

та разлому соответствует дислоцированная зона шириной около километра, в которой развиты рассланцованные серпентиниты, габброиды и серпентинитовый меланж. Разлом ограничивает с запада массив серпентинитовых перидотитов. На шельфе офиолитовый пояс, контролируемый Восточно-Сахалинским разломом, погружается в юго-восточном направлении до 5 км [4]. В осадочном чехле разлому соответствуют структуры Трехбратской и Восточно-Одоптинской антиклинальных зон.

В [16] Восточно-Сахалинский глубинный разлом рассматривается как крупная сдвиговая зона, в пределах которой интенсивно развиваются процессы серпентинизации ультраосновных пород и формирования инверсионных складчатых структур. При этом утверждается, что дизъюктивная нарушенность в зоне разлома, особенно для его южной части, характерна только для палеоген-миоценовых отложений. На основании этого можно сделать вывод о резком снижении его современной активности. Однако на всех сейсмических разрезах, представленных в работе [21], в районе Трехбратской антиклинальной зоны на уровне островного шельфа наблюдается абразия вершин складок в осадочном чехле, что свидетельствует о четвертичном поднятии этой зоны. Рассматриваемые складки в основном симметричны и связаны с молодой, вероятно, ранне-среднечетвертичной интрузией ультрабазитов по зоне фронтального глубинного разлома Сахалинской кордильеры [21] либо протрузией серпентинитов [16].

Итак, Восточно-Сахалинский разлом характеризуется современной активностью и его следует относить, по мнению В.В. Харахинова [16], к нижнекоровым листрическим разломам восточного падения с глубиной проникновения его субгоризонтальной части не менее 30–35 км, а связанные с ним землетрясения в большинстве своем являются средне- и нижнекоровыми и не исключена возможность возникновения крупных сейсмических событий.

Однако выявленные особенности строения разлома сложно увязать с современной сейсмической активностью данного района и его геологической структурой. Например, все эпицентры землетрясений в этой зоне (рис. 4) располагаются существенно восточнее оси Восточно-Одоптинской антиклинальной зоны, а в центральной и особенно северной ее частях они смещаются на восток на 30 км и более. Кроме того, взбросовый тип подвижки Пильтунского землетрясения 2005 г. не соответствует картине погружения восточного крыла разлома по геологическим данным.

Противоречия между сейсмологическими и геологическими данными могут быть устранены, если предположить, что разлом, который определяет сейсмичность данного района, располагается в основании восточного крыла Восточно-Одоптинской антиклинальной зоны. Такой разлом уверенно выделяется на всех сейсмических разрезах, представленных в [21], в осевой зоне узкого синклинального прогиба в рельефе фундамента глубиной 8-10 км, сопряженного с востока с выступом акустического фундамента. Он также является нижнекоровым, листрическим разломом, но в отличие от Восточно-Сахалинского имеет западное падение и отличается преимущественно взбросовым характером подвижек с активным западным крылом (рис. 6). Поскольку данный разлом открывает при движении с востока на запад систему субмеридиональных разломов Сахалина, то его предлагается называть Фронтальным.

Таким образом, в геологическом строении Северного Сахалина Одоптинскую и Восточно-Одоптинскую антиклинальные зоны в совокупности следует рассматривать как надвиговую пластину, которая по Фронтальному разлому смещается в восток северо-восточном направлении. Восточно-Сахалинский разлом представляет собой листрический сбросо-сдвиг в осевой части Восточно-Одоптинской антиклинальной зоны. А узкий прогиб в рельефе фундамента рассматривается как компенсированный осадками желоб в передней части крупной надвиговой пластины, ширина которой (рис. 6) составляет 50 км, а длина – более 250 км.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

За последние несколько десятилетий в мире выявлены неоднократные случаи [1, 2, 17–19, 22, 23, 25, 26, 28, 29 и др.], когда производственная деятельность на месторождениях полезных ископаемых, преимущественно на нефтегазовых, приводила к ощутимому изменению динамики сейсмического режима.

Рассматривая механизмы возникновения наведенной сейсмичности, можно выделить нижеследующие инициирующие факторы и классифицировать техногенные сейсмические события.

Во-первых, значительное увеличение естественного пластового давления, вызванное закачкой жидкости, приводит к уменьшению нормальных напряжений в геосреде, вследствие чего происходит образование разрывов согласно критерию Кулона-Мора. Возбуждение микроземлетрясений и/или слабых землетрясений может происходить в осадочном чехле или в самой залежи. Энергия таких событий обычно невелика и ограничена по магнитуде $M \sim 3.0$.

Во-вторых, снижение естественного пластового давления вследствие отбора углеводородного сырья вызывает уплотнение рыхлых и слабосцементированных структур, приводящее к проседанию



Рис. 6. Разрез земной коры Сахалина и его северо-восточного шельфа на широте Пильтунского землетрясения 2005 г.

I – очаг землетрясения; 2 – разломы: a – (сплошные линии) – установленные, δ – (пунктир) – предполагаемые.

поверхности Земли и возможному возбуждению микросейсмической активности на малых глубинах. Значительное снижение естественного пластового давления способно вызвать упругие напряжения в пористой среде вокруг залежи, что, в свою очередь, может привести к сбросообразованию в структурах, окружающих залежь, и возникновению землетрясений ($M \le 5.0$) на границах залежи либо в зоне контакта между породами осадочного чехла и кристаллического фундамента [23].

Сейсмические события, относящиеся к первому или второму случаям, классифицируются как индуцированные. Отметим, что такие сейсмические проявления происходят, как правило, спустя десятилетия после начала производственной деятельности, когда естественное начальное давление в пласте значительно изменяется (на 50 % и более).

В-третьих, гидростатические силы, которые вызывают передачу порового давления из зоны закачки жидкости (например, воды при компенсации отбора нефти и газа либо отработанного бурового шлама, при утилизации промысловых сточных вод и т.д.) к очагу землетрясения по разлому и проницаемым пластам, могут приводить к ослаблению прочностных характеристик геосреды, при этом объем самого переносимого флюида может быть невелик.

В-четвертых, предполагается, что при продолжительной (20–30 лет) эксплуатации месторождений происходит нарушение равновесных условий в геосреде, что вызывает критическое перераспределение напряжений в самой залежи и вмещающих породах. В совокупности это может спровоцировать разрядку ранее накопленных естественных напряжений в близлежащих зонах с активными тектоническими нарушениями. События, относящиеся к третьему или четвертому случаям, классифицируются как триггерные. Энергия триггерных событий не может быть выше энергии землетрясений естественного происхождения. Вероятно, пример самого сильного проявления триггерной сейсмичности – серия сильных землетрясений ($M \sim 7.0$) на газовом месторождении (Газли) в Средней Азии [2].

Характер сейсмической активизации в 2005– 2009 гг. интерпретировался в работе [15], согласно данным оперативной обработки, как проявление наведенной сейсмичности, спровоцированной в результате промышленной разработки нефтегазоконденсатного месторождения Пильтун-Астохское. Результаты детальных наблюдений и анализа сейсмичности не подтверждают основные аргументы этого тезиса.

По мнению авторов, незначительная продолжительность производственной деятельности на месторождении Пильтун-Астохское (добыча нефти началась в 1999 г.), которая до 2006 г. носила эпизодический (сезонный) характер с небольшой интенсивностью отбора нефти [34], а также удаленность, как в плане, так и по глубине, очагов Пильтунского землетрясения 2005 г. и последующих событий от контура месторождения (эпицентры землетрясений локализованы на расстоянии более 20 км к востоку от восточной границы месторождения) дает основание классифицировать рассматриваемые землетрясения как фоновые и естественной тектонической природы.

Кроме того, схожие по силе и типу подвижки Уангское 2010 г. [8] и Пильтунское 2005 г. землетрясения имеют дополнительное сходство. Они являются самыми сильными событиями в пределах соответственно западной и восточной сейсмогенных зон на севере острова. Их возникновение может свидетельствовать об активизации сейсмичности в регионе (возможно, не только на Сахалине).

выводы

Многоплановое исследование Пильтунского землетрясения 2005 г. позволило дать сейсмотектоническую и структурно-геологическую интерпретацию данного явления.

По совокупности независимых определений механизма очага Пильтунского землетрясения 2005 г. установлено, что землетрясение с подвижкой взбросо-сдвигового типа произошло в условиях субширотного сжатия и связано с перемещением по Фронтальному глубинному разлому, расположенному в основании восточного крыла Восточно-Одоптинской антиклинальной зоны. Направление простирания одной из плоскостей разрыва параллельно ориентации этой зоны и ее максимальных поднятий. Это позволяет сделать вывод, что подвижка в очаге произошла по плоскости, падающей на запад.

Современная сейсмическая активность северовосточной шельфовой зоны отнюдь не ограничивается районом Пильтунского землетрясения. Землетрясения происходят в пределах Фронтального глубинного разлома, протяженность которого составляет приблизительно 250–300 км, и имеют группированный характер.

В последнее десятилетие на севере о. Сахалин ведутся интенсивные работы по развитию нефтегазодобывающей отрасли. При этом районы промышленной разработки шельфовых нефтегазовых месторождений и подавляющая часть сопутствующей инфраструктуры расположены в зоне активных тектонических нарушений разного ранга и возраста, выявленных по результатам многочисленных геолого-геофизических исследований. В этой связи можно надеяться, что результаты, полученные в данной работе, будут востребованы для уточнения сейсмического потенциала шельфа о. Сахалин и будут учитываться при инженерно-сейсмологических изысканиях.

Вместе с тем, опыт, полученный в данной работе, можно будет в дальнейшем применять для выработки объективных критериев распознавания сейсмичности, которая может возникнуть в районе нефтегазовых месторождений северо-восточного шельфа о. Сахалин в результате их многолетнего промышленного освоения.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14-05-00765 А и 14-05-31323 мол а).

Детальные сейсмологические наблюдения на Северном Сахалине для изучения сейсмического режима в районе нефтегазовых месторождениий северо-восточного шельфа о. Сахалин и на территории сопутствующей инфраструктуры проводятся ИМГиГ ДВО РАН в рамках программ сейсмического мониторинга компаний «Эксон Нефтегаз Лимитед» и «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.» – операторов проектов «Сахалин-1» и «Сахалин-2», соответственно. Авторы благодарны компаниям за предоставленную возможность опубликовать результаты наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Турунтаев С.Б., Куликов В.И. и др. Техногенно-индуцированные катастрофические процессы в земной коре // Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. В 8 т. / Под ред. Н.П. Лаверова. Т. 1. Сейсмические процессы и катастрофы / Отв. ред. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 100–126.
- Акрамходжаев А.М., Ситдиков Б.Б., Бегметов Э.Ю. О возбужденном характере Газлийских землетрясений в Узбекистане // Узбек. геол. журн. 1984. № 4. С. 17–19.
- Василенко Н.Ф., Прытков А.С. Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 1. С. 42–28.
- Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. Неотектоника и активные разрывы Сахалина. М.: Наука, 2007. 186 с.
- Каталог землетрясений Сахалина за 2005 год // Землетрясения Северной Евразии 2005. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 465–470.
- Коновалов А.В., Иващенко А.И. Многоканальный анализ кепстров для определения глубины очага мелкофокусного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 55–64.
- Коновалов А.В., Степнов А.А., Патрикеев В.Н. Организация автоматизированного рабочего места сейсмолога с использованием пакета сейсмологических программ SEISAN // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47, № 4. С. 34–49.
- Коновалов А.В., Семенова Е.П., Сафонов Д.А. Результаты детального изучения очаговой зоны землетрясения 16 марта 2010 года (Мw = 5.8) на северо-западе о. Сахалин // Вулканология и сейсмология. 2012. № 4. С. 37–49.
- Маргулис Л.С., Мудрецов В.Б., Сапожников Б.Г. и др. Геологическое строение северо-западной части Охотского моря // Сов. геология. 1979. № 7. С. 61–71.
- Поплавская Л.Н., Бобков А.О., Кузнецова В.Н., Нагорных Т.В., Рудик М.И. Принципы формирования и состав алгоритмического обеспечения регионального центра обработки сейсмологических наблюдений (на примере Дальнего Востока) // Сейсмологические наблюдения на Дальнем Востоке СССР (методические работы ЕССН). М.: Наука, 1989. С. 32–51.
- Поплавский А.А., Куликов Е.А., Поплавская Л.Н. Методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами. М.: Наука, 1988. 128 с.
- Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005 гг. / Отв. ред. Л.Н. Поплавская. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.
- 13. Сафонов Д.А., Коновалов А.В. Апробация вычислительной

программы FOCMEC для определения фокальных механизмов землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 3. С. 102–117.

- Сейсмологические таблицы. М.: ИФЗ АН СССР, 1962. С. 75–80.
- 15. Тихонов И.Н. О наведенной сейсмичности на шельфе острова Сахалин вблизи Пильтун-Астохского нефтегазоконденсатного месторождения // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 3. С. 59–63.
- Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Науч. мир, 2010. 276 с.
- Baranova V., Mustaqeem A., Bell S. A model for induced seismicity caused by hydrocarbon production in the Western Canada sedimentary basin // Can. J. Earth Sci. 1999. V. 36. P. 47–64.
- Bossu R., Grasso J.R., Plotnikova L.M. et al. Complexity of intracontinental seismic faultings: The Gazli, Uzbekistan, sequence // Bull. Seis. Soc. Am. 1996. V. 86. P. 959–971.
- Grasso J.R. Mechanics of seismic instabilities induced by the recovery of hydrocarbons // Pure Appl. Geophys. 1992. V. 139. P. 507–534.
- Lienert B.R.E., Havskov J. Hypocenter 3.2: A computer program for locating earthquakes locally, regionally and globally // Seis. Res. Lett. 1995. V. 66. P. 26–36.
- Lomtev V.L., Litvinova A.V. New data on the structure of the offshore margin of the Northern Sakhalin // Geodynamics & Tectonophysics. 2011. V. 2, N 1. P. 83–94.
- McGarr, A., Simpson D., Seeber L. Case histories of induced and triggered seismicity // International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A / W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, C. Kisslinger (ed.) Academic Press, London, 2002. P. 647–661.
- Ottemöller L., Nielsen H.H., Atakan K. et al. The 7 May 2001 induced seismic event in the Ekofisk oil field, North Sea // J.

Geophys. Res. 2005. V. 110, N B10301. P. 1-15.

- 24. Ottemöller L., Voss P., Havskov J. Seisan earthquake analysis software for Windows, Solaris, Linux and Macosx. 2011, https://www.uib.no/rg/geodyn/artikler/2010/02/software.
- Segall P. Induced stresses due to fluid extraction from axisymmetric reservoirs // Pure Appl. Geophys. 1992. V. 139. P. 535– 560.
- Segall P., Grasso J.R., Mossop A. Poroelastic stressing and induced seismicity near the Lacq gas field, southwestern France // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. 15423–15438.
- Snoke J.A., Munsey J.W., Teague A.C. et al. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data // Earthquake Notes. 1984. V. 55, N 3. P. 15.
- Suckale J. Induced seismicity in hydrocarbon fields // Advances in Geophysics. 2009. V. 51. P. 55–106.
- Van Eijs R.M.H.E., Mulders F.M.M., Nepveu M. et al. Correlation between hydrocarbon reservoir properties and induced seismicity in the Netherlands // Environmental Geol. 2006. V. 84. P. 99–111.
- 30. <u>http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_</u>rect.php, National Earthquake Information Center of United States Geological Survey.
- 31. <u>http://www.bosai.go.jp</u>, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention.
- 32. <u>http://www.globalcmt.org</u>, The Global Centroid-Moment-Tensor Project.
- <u>http://www.iris.edu</u>, Incorporated Research Institutions for Seismology.
- 34. http://www.ogj.ru/projects/partners/Sakhalin.html.

Рекомендована к печати Б.В. Левиным

A.V. Konovalov, V.N. Patrikeev, D.A. Safonov, T.V. Nagornyh, E.P. Semenova, A.A. Stepnov

The June 12, 2005 Mw 5.6 Piltun earthquake and recent seismicity within the oil and gas fields' area in the northeastern zone, Sakhalin Island

An earthquake with a moment magnitude of Mw = 5.6 occurred on June 12, 2005 at 4 h 17 min UTC in the northeastern part of the Sakhalin Island in the vicinity of the offshore Piltun-Astokhsky oil and gas field, being developed since 1999. All the available instrumental records were analyzed to develop a reliable source model. The recent seismicity in the examined area was analyzed according to the detailed seismological observations. The obtained results were compared with the new data on geological and tectonic settings in the examined area. The present paper provides a basis for investigation of objective criteria for natural and triggered seismicity discrimination in tectonically active regions, including the oil and gas fields' area in the northeastern offshore zone of Sakhalin Island, and understanding of physical aspects of the phenomena.

Key words: induced seismicity, oil and gas fields, seismotectonics, seismic regime, Sakhalin Island.