

УДК 551.435.62; 551.243

ПОДВОДНЫЕ ОПОЛЗНИ НА ЗАПАДНОМ СКЛОНЕ КУРИЛЬСКОЙ КОТЛОВИНЫ ОХОТСКОГО МОРЯ

© 2018 г. Б. В. Баранов¹, В. Г. Прокудин², Я.-К. Джин³,
К. А. Дозорова¹, Д. Д. Рукавишникова¹

¹Институт океанологии им П.П. Шишова РАН, Москва, Россия
e-mail: b.baranov@rambler.ru; karina.dozorova@yandex.ru; drukavishnikova@gmail.com

²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия
e-mail: prokudin@poi.dvo.ru

³Корейский институт полярных исследований, Инчон
e-mail: ykjin@kopri.re.kr

Поступила в редакцию 28.06.2016 г., после доработки 18.04.2017 г.

Батиметрические и сейсмические данные, полученные в рамках двух международных проектов (KOMEX и SSGH), использовались для изучения оползневых процессов на западном склоне Курильской котловины. Установлено, что крупные оползни площадью более 100 км² располагаются на склонах Северо-Хоккайдского краевого плато и вблизи хребта Терпения в обстановке открытых континентальных склонов. Оползневые блоки размерами до 2 км и отложения перемещенных масс приурочены к подводным каньонам – конусам выноса склона залива Терпения. Возраст оползней оценивается как среднеплейстоцен-голоценовый. Оползневые процессы провоцируются сейсмической активностью и газонасыщенностью осадочной толщи. Существует вероятность дальнейшего обрушения склона Курильской котловины с образованием оползней, способных генерировать цунами.

DOI: 10.7868/S0030157418030103

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучению причин возникновения оползней на морском дне, выяснению их основных характеристик, связи с другими геологическими процессами и возможности генерации волн цунами в настоящее время уделяется пристальное внимание [17, 20, 30, 32–34]. Подводные оползни были обнаружены во многих регионах Мирового океана, в том числе в ряде важных нефтегазоносных провинций, таких как континентальная окраина Норвегии, Гвинейский залив, Мексиканский залив и Каспийское море [14]. В связи с этим повышенный интерес к данному природному явлению обусловлен не только научными, но и практическими задачами, связанными с обеспечением безопасной добычи углеводородных ресурсов на шельфе и континентальном склоне [16, 30].

Восточный шельф и склон о. Сахалин является перспективным нефтегазоносным регионом, где добыча нефти и газа идет на ряде участков, расположенных на шельфе северо-восточной и центральной частей острова [12]. В связи с этим исследование оползней в этом регионе представляет интерес не только с научной, но и прикладной точки зрения.

На восточном склоне о. Сахалин оползни были обнаружены вдоль всего склона. Обрушение

в северной части склона затронуло участок длиной 70 км, объем перемещенных осадков составил 660 км³ [35]. Современный оползень площадью 42 км² и объемом 4 км³ был выделен в центральной части склона [1]. Широкое распространение оползней отмечалось в южной части восточного склона о. Сахалин (западном склоне Курильской котловины) [10, 21], однако данный вывод был основан только на наличии широкого континентального подножья, которое образовалось за счет аккумуляции оползневых отложений, и анализе отдельных сейсмических профилей. Картирование оползней, рассмотрение их характерных особенностей и оценка возраста не проводились.

Этот пробел восполнен в настоящей работе при обобщении и анализе геолого-геофизических данных, полученных авторами в пяти морских экспедициях на западном склоне Курильской котловины в рамках двух международных проектов: Kurile-Okhotsk Marine Experiment (KOMEX, 1998–2004) и Sakhalin Slope Gas Hydrates (SSGH, 2003–2015). Специальных исследований оползневых процессов по проектам KOMEX и SSGH не проводилось, тем не менее, имеющийся материал дал возможность выделить участки склона, которые подверглись обрушению, получить представление об образовавшихся оползневых структурах и оценить их возраст.

2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ

Район исследований расположен в юго-западной части Охотского моря (рис. 1а). Охотское море, его северное побережье, полуостров Камчатка и северо-восточная часть о. Хоккайдо принадлежат к Охотской плите. Западная граница Охотской плиты проходит вдоль о. Сахалин [31], где соответствует системе субмеридиональных глубинных разломов, которые были выделены на самом острове, его шельфе и склоне [12].

В район исследований входят три структурные единицы: шельф заливов Анива и Терпения, западный склон Курильской котловины и западная часть самой котловины. Область шельфа занимает Южно-Сахалинский осадочный бассейн, который состоит из прогибов Анива и Терпения. Фундамент прогибов имеет мезозойский возраст и представлен блоками континентальной и океанической коры. Мощность осадочного чехла в прогибах составляет от 2 до 8 км [12].

Западный склон Курильской котловины является областью перехода от континентальной коры шельфа к океанической коре котловины [8]. Мощности осадочного чехла здесь сильно варьируют. На крутых участках склона, таких как восточный склон хребта Терпения, обнажаются породы акустического фундамента, представленные вулканогенно-обломочными и вулканогенно-осадочными породами маастрих-датского возраста [11].

Фундамент Курильской котловины, ложе которой представляет собой абиссальную равнину, с глубинами около 3300 м, полностью перекрыт осадочным чехлом. Максимальная мощность осадочных отложений в котловине достигает 3000 м. В чехле выделено четыре слоя со скоростями сейсмических волн от 1.6 до 3.5 км/с. Верхняя часть фундамента по скоростным параметрам соответствует второму океаническому слою [7].

3. ДАННЫЕ

Подводные оползни на детальных картах морского дна хорошо выделяются в рельефе по морфологии [25]. Наиболее примечательным морфологическим элементом являются стенки отрыва оползня (англ. headwall scarps) и его боковые стенки (англ. side scarps), высота которых составляет десятки и более метров, в длину они могут протягиваться до первых сотен километров. Для выяснения поддонного строения оползневых тел используются различные сейсмоакустические методы. Анализ сейсмических профилей дает возможность по характеру волновой картины выделять в разрезе

оползневые отложения и определять положение плоскости скольжения [23].

В настоящей работе использовались данные батиметрической и сейсмической съемок, полученные в морских экспедициях в 2004–2015 гг. (проекты KOMEX и SSGH). Батиметрические исследования проводились с использованием эхолотов двух типов: судового однолучевого эхолота ELACLAZ-72 E-V с частотой 12 кГц и судового многолучевого эхолота “SIMRAD EM 120” с частотой 12 кГц [19, 26].

При сейсмоакустических исследованиях проекта SSGH применялась система ‘SONIC-4M’. В качестве источника использовался электроискровой излучатель энергией 4000 Дж. Приемником являлась одноканальная сейсмокофа, содержащая группу из 160 пьезодатчиков. Регистрация данных осуществлялась в интервале частот 210–1500 Гц. Разрешение составляло 2–5 м, длительность записи 500 мс [26]. Сейсмические исследования проекта KOMEX выполнялись с использованием пневмоисточников [35]. Батиметрические и сейсмические исследования проводились как на отдельных профилях, так и на полигонах (рис. 1б).

Целенаправленного опробования оползневых структур при наших исследованиях не проводилось, поэтому полученные результаты базировались на анализе сейсмических и батиметрических данных. На сейсмических разрезах для определения этих структур нами использовался термин “отложения перемещенных масс” (англ. mass transport deposits). Термин был введен при интерпретации сейсмических данных [например, 33] и в случае отсутствия данных по рельефу и веществу служит для общей характеристики подобного рода отложений. Данные батиметрической съемки позволили выделить среди отложений перемещенных масс оползневые и оползневые блоки.

Оползневые процессы, в основном, приурочены к склону, особенности рельефа которого, такие как крутизна и расчлененность, во многом определяют характер его обрушения и тип перемещенного материала [17, 23]. Ниже приведено генеральное описание рельефа этого структурного элемента в районе исследований с целью выделения участков склона, отличающихся по своей морфологии. При описании использовались результаты более ранних исследований [9, 10] и данные, полученные в наших экспедициях.

4. МОРФОЛОГИЯ ЗАПАДНОГО СКЛОНА КУРИЛЬСКОЙ КОТЛОВИНЫ

Южная часть района исследований захватывает окончание Северо-Хоккайдского краевого плато (рис. 1а). Ширина плато составляет здесь около

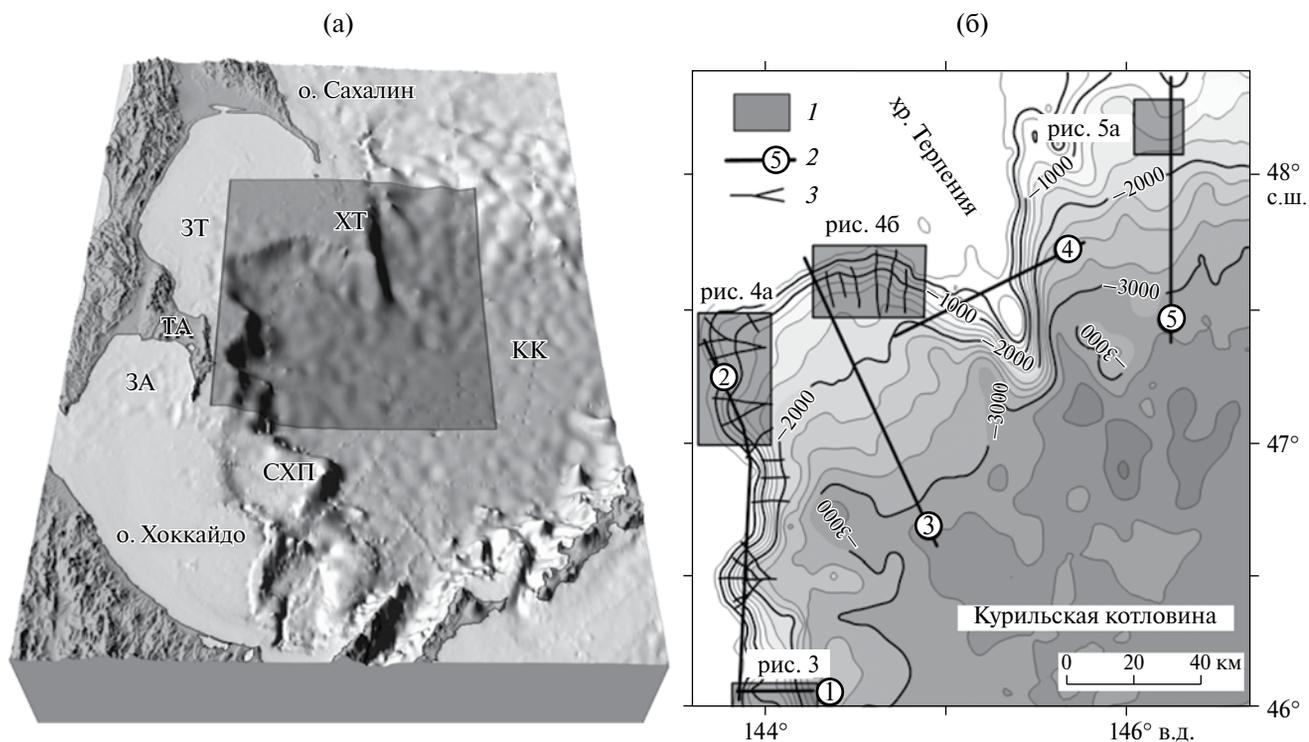


Рис. 1. (а) – Трехмерная карта юго-западной части Охотского моря и положение района исследований (серый прямоугольник). Сокращения: СХП – Северо-Хоккайдское краевое плато, ЗА – залив Анива, ТА – Тонино-Анивский полуостров, ЗТ – залив Терпения, ХТ – хребет Терпения, КК – Курильская котловина; (б) – батиметрическая карта района исследований. 1 – полигоны, 2 – батиметрические профили и их номера, 3 – оси каньонов. Изобаты проведены через 250 м. При подготовке карт использовались данные проекта SRTM (Satelite Radar Topographic Misson) [2].

10 км; в Курильскую котловину оно обрывается уступом высотой до 500 м (рис. 2, проф.1). В основании уступа располагается узкое континентальное подножье, ограниченное изобатой 2500 м.

С севера плато ограничивается крупным каньоном, который отчетливо виден даже на мелко-масштабных картах (рис. 1). Каньон имеет субширотное простирание, глубину – 2000 м, ширину – 35 км и состоит из нескольких русел (рис. 2, проф. 2). В устье каньона изобаты 2750–3000 м вытягиваются в субширотном направлении, формируя пологое поднятие, образование которого, по всей видимости, связано с выносом по каньону осадочного материала с шельфа и склона в Курильскую котловину.

К северу от каньона, в заливе Терпения, морфология склона существенно изменяется. От перегиба шельфа до изобаты 1500 м склон наклонен под углом 4–5°, ниже этой изобаты он выполаживается до 1° и на глубинах 3300 м переходит в абиссальную равнину Курильской котловины (рис. 1б, рис. 2, проф. 3). В интервале глубин от 200–500 м до 1500–1600 м склон рассечен многочисленными каньонами. Ширина наиболее крупных каньонов достигает 10 км при глубине до

800 м; склоны каньонов крутые с углами наклона до 15–20° (рис. 2, проф. 2). На этом участке склона выделяется широкое континентальное подножье, образовавшееся за счет аккумуляции оползневых отложений, перемещенных по каньонам со склона в котловину [10].

Хребет Терпения является подводным продолжением полуострова Терпения и разделяет западный и северный склоны Курильской котловины. В своей южной части хребет возвышается над дном котловины на 2500–2750 м. Западный борт хребта простирается в северо-западном направлении, углы его наклона равны 3–5°. Восточный борт хребта имеет субмеридиональное простирание и крутой (10° и более) склон (рис. 2, проф. 4). Северный склон Курильской котловины является пологим (рис. 2, проф. 5), его углы наклона равны 2–4°.

5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОПОЛЗНЕЙ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

Приведенное выше описание позволяет выделить участки склона, различающиеся по своей морфологии, а именно: Северо-Хоккайдское

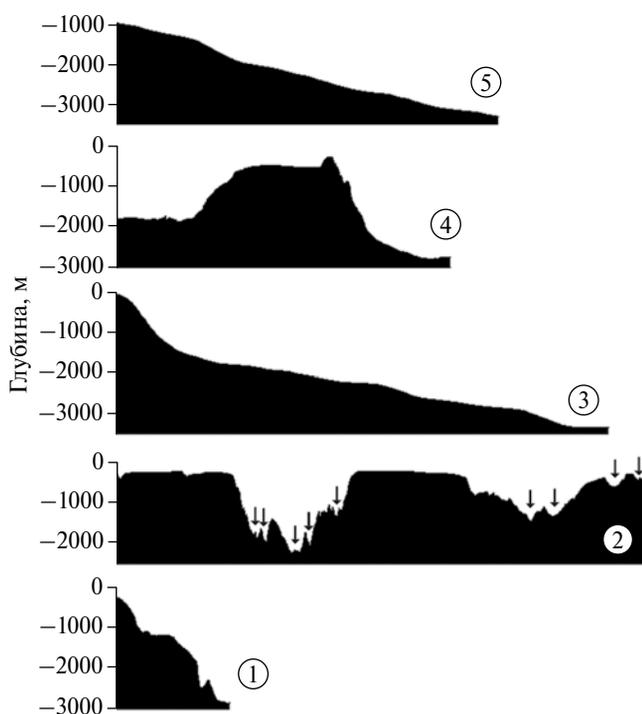


Рис. 2. Батиметрические профили, иллюстрирующие морфологию склона в районе исследований. Стрелками обозначены оси каньонов. Профили 1, 2 и 4 были получены в рейсах по проекту SSGH, профили 3 и 5 составлены с использованием карты на рис. 1б. Положение профилей см. рис. 1б.

краевое плато, залив Терпения и хребет Терпения вместе с прилегающим к нему северным склоном Курильской котловины. Наши исследования проводились к северу от 46° с.ш. и отложения перемещенных масс были выявлены на каждом из этих участков.

5.1 Северо-Хоккайдское краевое плато. На склоне Северо-Хоккайдского краевого плато крупный оползневой комплекс был обнаружен мористее южного окончания Тонино-Анивского п-ова (рис. 1, 3). Оползневой комплекс, по всей видимости, состоит из оползневых тел, границы которых не могли быть установлены при существующей детальности батиметрической съемки однолучевым эхолотом. Тем не менее, батиметрические и сейсмоакустические данные позволили выделить верхнюю и нижнюю стенки отрыва оползня, отложения перемещенных масс и оползневые блоки. Верхняя стенка отрыва оползня расположена в северной части полигона на глубинах 450–900 м и протягивается на расстояние в 7 км. На трех пересекающих ее сейсмических разрезах она соответствует уступу высотой до 300 м или нескольким уступам высотой до 70 м (рис. 3, карта, проф. LV70_38 и LV62_11). Основание нижней стенки отрыва располагается в южной части полигона

на глубинах 1500–2000 м; высота стенки равна 350–700 м, протяженность составляет более 10 км (рис. 3, карта, проф. LV62_11).

На юге полигона в верхней и средней частях склона на временных сейсмических разрезах выделяется сейсмофация параллельных отражающих горизонтов, которые полого наклонены в сторону котловины (рис. 3, проф. LV62_11). Разрез северной части полигона представлен двумя сейсмофациями, нижняя из них также состоит из параллельных отражающих горизонтов. Верхняя сейсмофация имеет холмистый рельеф кровли и хаотические поддонные отражения, что является характерным для отложений перемещенных масс. Несогласный контакт между верхней и нижней сейсмофациями соответствует плоскости скольжения, по которой происходило перемещение осадочного материала (рис 3, проф. LV70_38).

Глубже нижней стенки отрыва склон имеет более сложное строение, что обусловлено наличием поднятий в интервале глубин 2000–2750 м. Поднятия простираются в северо-восточном и субширотном направлениях, их длина достигает 6 км, ширина составляет 4 км (рис. 3, карта, проф. LV70_37). Поддонные отражения на поднятиях практически отсутствуют, и на сейсмических разрезах осадочная толща является акустически прозрачной или мутной. Параллельные отражающие горизонты появляются только на отдельных участках сейсмических разрезов; они наклонены в северном направлении и срезаются крутыми склонами поднятий (рис. 3, проф. LV70_37). Сходство разрезов, представленных сейсмофацией с параллельными рефлекторами на склоне и поднятиях, дает основание интерпретировать последние в качестве оползневых блоков.

Выше отмечалось, что оползень имеет сложное строение и, по всей видимости, его формирование происходило в несколько этапов. Возраст двух эпизодов разрушения склона был ориентировочно оценен на основании анализа сейсмического разреза LV70_38 (рис. 3). В левой части этого разреза видны параллельные отражающие горизонты, которые падают на восток в сторону котловины. Эти горизонты срезаны стенкой отрыва оползня и несогласно перекрываются вышележащим акустически прозрачным горизонтом, возраст подошвы которого будет соответствовать времени обрушения склона. Мощность акустически прозрачного горизонта равна 0.1 с или 80 м при скорости волн в осадках 1600 м/с. Средняя скорость осадконакопления на западном склоне Курильской котловины в голоцене по данным шести колонок, полученных в рамках проекта SSGH составляет 30 см за 1000 лет [26–29]. Предполагая аналогичные значения скоростей осадконакопления на всю мощность

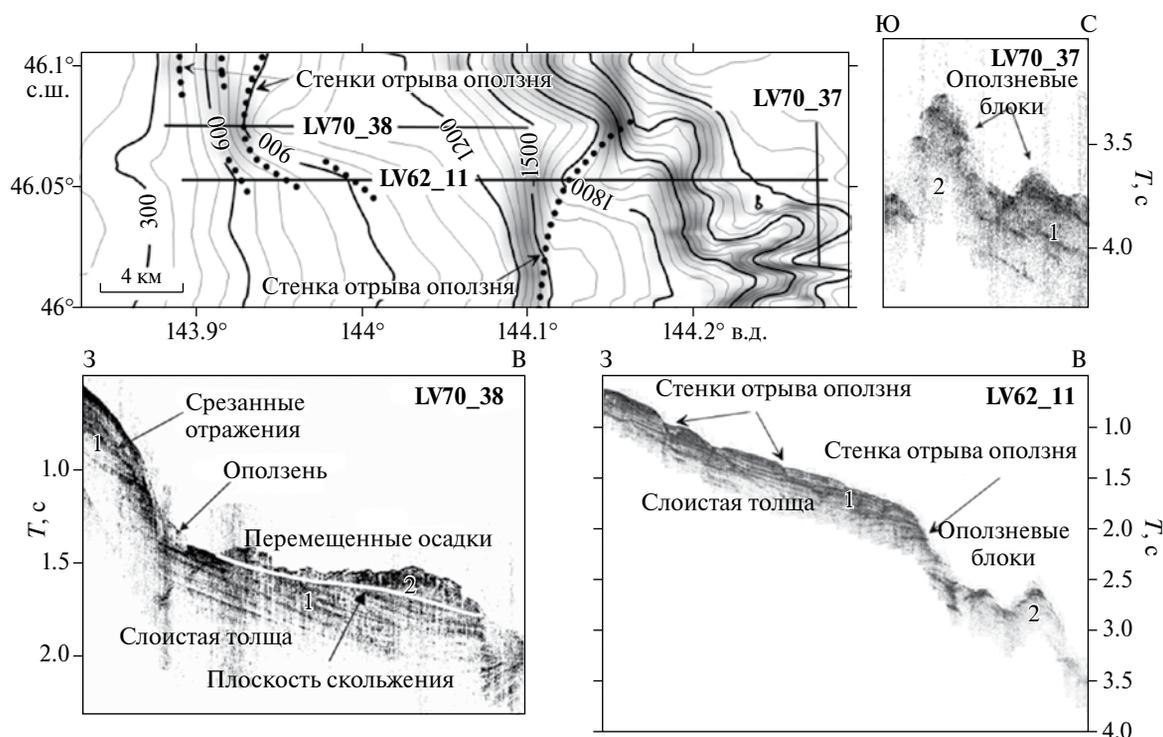


Рис. 3. Теневая батиметрическая карта полигона, расположенного на склоне Северо-Хоккайдского краевого плато с положением сейсмических профилей и их временные разрезы верхней части осадочного чехла (проект SSGH). Сейсмофации: 1 – с параллельными рефлексорами, 2 – с мутной или с хаотической структурой. Сечение изобат 75 м. $T, с$ – удвоенное время пробега волны в секундах. Положение полигона см. на рис. 1б.

акустически прозрачного горизонта, возраст обрушения склона будет равен 267 тыс. лет (средний плейстоцен). На временном разрезе LV70_38 (рис. 3) видно, что прозрачный горизонт на более крутом участке склона тоже обрушился с формированием небольшого оползня в основании уступа, что, вероятно, произошло на самом позднем этапе формирования этой структуры (голоцен?).

Площадь оползневого комплекса ориентировочно составляет около 200 км². Имеющиеся данные [28, 29] дают основание предполагать, что оползневые тела распространяются за пределы северной и южной границ полигона и суммарные размеры оползневого комплекса могут существенно превышать 200 км².

5.2 Залив Терпения. На склоне залива Терпения при батиметрической съемке однолучевым эхолотом характерных оползневых тел выделено не было. В то же время на сейсмоакустических разрезах оползневые блоки и отложения перемещенных масс встречаются повсеместно, примеры двух из них приведены на рис. 4. На первом сейсмическом разрезе, который проходил по оси субширотного каньона, по характеру отражений можно выделить две сейсмофации (рис. 4а). Верхняя сейсмофация характеризуется наличием отражающих

горизонтов, отделяется от нижней высокоамплитудным рефлексором и ее мощность постепенно уменьшается вниз по склону. Кровля нижней сейсмофации местами имеет холмистый рельеф, отражающие горизонты в ней отсутствуют, на отдельных участках разреза сейсмофация является акустически прозрачной или мутной. Эти особенности дают основание предполагать, что нижняя сейсмофация состоит из отложений перемещенных масс.

Мощности голоцена в колонке LV59-09НС, отобранной на сейсмическом профиле LV56-01, и колонке LV59-11НС, взятой в 6 км к северу от профиля (рис. 4а), равны 390 см и 405 см соответственно [27]. Исходя из этих значений, скорости осадконакопления в голоцене на данном участке склона будут примерно одинаковыми и равными 33 см за 1000 лет. В точке отбора колонки LV59-09НС оползневые отложения перекрыты слоистой осадочной толщей (верхняя сейсмофация) мощностью 60 мс или 48 м при скорости волн в осадках, равной 1600 м/с. Если предположить, что скорость осадконакопления для всей слоистой толщи была равна 33 см за 1000 лет, то возраст ее подошвы и, соответственно, возраст образования оползня будут равны 145 тыс. лет (верхи среднего плейстоцена).

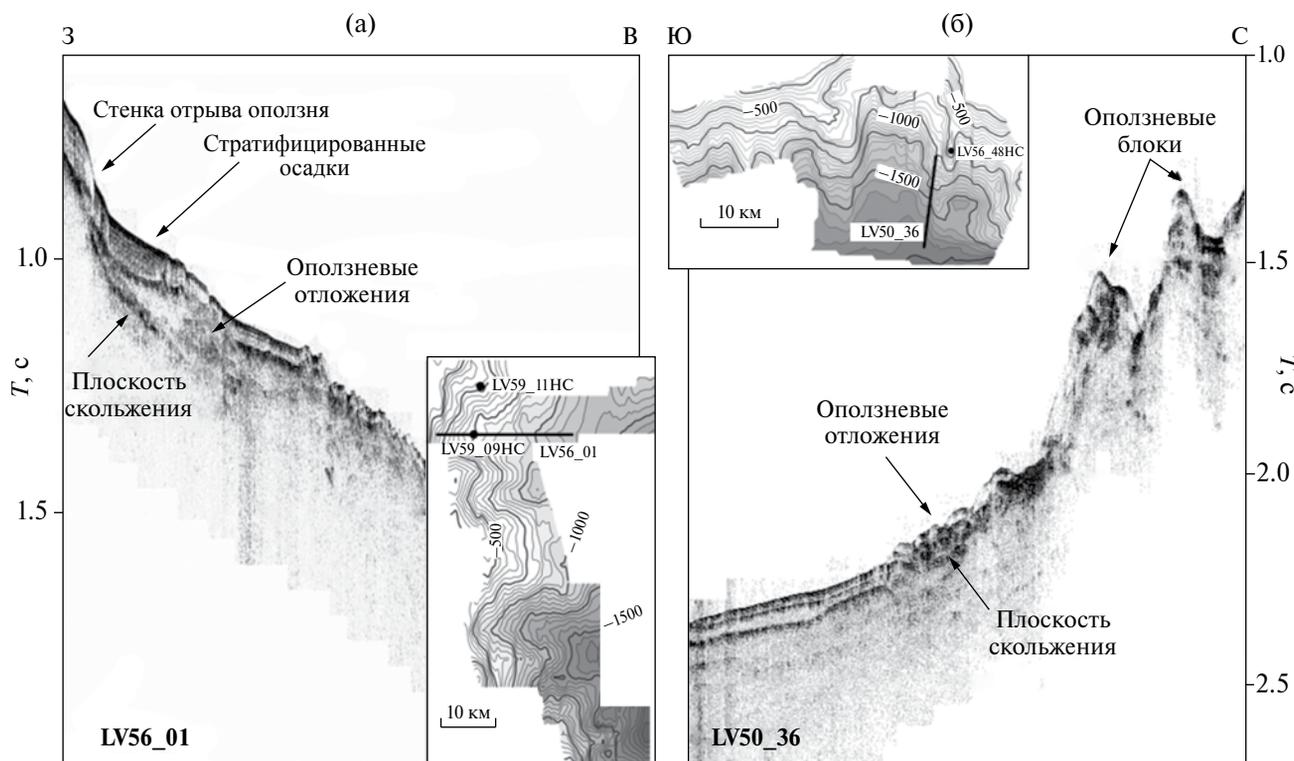


Рис. 4. Сейсмические временные разрезы с примерами отложений перемещенных масс с мутной или хаотической внутренней структурой: (а) перекрытые и (б) не перекрытые стратифицированными осадками. На врезках показаны батиметрические карты полигонов на склоне залива Терпения с положением профилей (жирные линии), станций (залитые кружки) и их номера. Изобаты проведены через 50 м. Съемка выполнена однолучевым эхолотом (проект SSGH). Положение полигонов см. на рис. 16.

Выше по склону верхняя сейсмофазия смещена с образованием в рельефе уступа высотой около 50 м (рис. 4а). Смещение не затронуло нижележащий высокоамплитудный отражающий горизонт, поэтому можно предполагать, что оно не связано с разрывным нарушением, а соответствует стенке отрыва оползня, которая образовалась после отложения верхней толщи, вероятно, в голоценовое время.

На втором временном сейсмическом разрезе отложения перемещенных масс залегают на борту каньона субмеридионального простирания (рис. 4б, врезка). В северной части разреза на склоне каньона находятся два оползневых блока с поперечными размерами до 2 км и высотой до 170 м (рис. 4б). Первичная структура отложений в блоках разрушена, высокоамплитудные отражения фиксируются только в их верхней части. Вниз по склону, начиная с изобаты 1500 м и на протяжении 3,5 км, дно имеет бугристую поверхность, а верхняя часть разреза характеризуется высокоамплитудными волнистыми отражениями, что характерно для отложений перемещенных масс. Эти отложения перекрывают стратифицированную толщу, обнажающуюся ниже по склону; возможно, они

образовались за счет частичного обрушения расположенного выше оползневых блока.

Доказательства наличия отложений перемещенных масс на борту каньона были получены при анализе колонки LV56-48HC, которая была отобрана вблизи сейсмического профиля на глубине 622 м (рис. 4б, врезка). Длина колонки равна 383 см и ее верхняя часть состоит из алевритово-глинистого ила позднплейстоценового возраста [26]. Ниже глубины 230 см в колонке присутствуют прослой турбидитового песка, а в интервале 344–383 см она, в основном, сложена несортированным грубо-зернистым материалом – смесью алеврита, песка, гравия и гальки. Это указывает на перемещение осадочного материала гравитационным потоком с верхних участков склона или шельфа, которое произошло в позднплейстоценовое время.

5.3 Хребет Терпения. Для западного склона хребта Терпения отмечалось, что он “завален продуктами оползания” [10], без указания местоположения и описания характерных особенностей оползневых отложений. Стенки отрыва оползней и отложения перемещенных масс выделяются на двух сейсмических разрезах, полученных в рейсах по проектам KOMEX и SSGH. Разрезы пересекали западный

склон хребта Терпения и были расположены на расстоянии около 20 км друг от друга. Отсутствие кондиционной батиметрической съемки оставляет открытым вопрос о том, принадлежат ли эти стенки к одной оползневой структуре или относятся к изолированным оползням. На имеющихся в нашем распоряжении сейсмических разрезах отложения перемещенных масс на восточном склоне хребта Терпения отсутствуют.

Характерный подводный оползень был обнаружен на полигоне, расположенном в 14 км к востоку от подножья хребта Терпения (рис. 16). В головной части оползня на глубинах 1490 и 1560 м располагаются два уступа высотой до 30 м, которые в плане имеют форму амфитеатра. Еще один уступ высотой 40–50 м находится в южной части полигона на глубинах 1950–2000 м (рис. 5). Длина закартированного участка оползня составляет 20 км. Возраст оползня не установлен, возможно, он образовался в голоцене.

При батиметрической съемке была закартирована только восточная часть оползня, ограниченная боковой стенкой высотой 40–50 м. Положение западной боковой стенки и хвостовой части оползня не установлено. Площадь восточной части оползня равна 56 км², объем составляет около 3 км³. На сейсмическом профиле SE-31 (проект КОМЕХ), проходящем в 12 км к западу от полигона, на глубине 1800 м располагается оползневой уступ высотой 100 м. Если предположить, что данный уступ принадлежит к описанному выше

оползнию, то размеры оползневого тела будут значительно больше и превысят 100 км².

6. ОБСУЖДЕНИЕ

6.1 Оползневые обстановки западного склона Курильской котловины. На западном склоне Курильской котловины, в соответствии с классификацией из работы [23], можно выделить две обстановки, где подводные оползни вследствие определенной комбинации характера осадконакопления и физиографии широко распространены, а именно: 1 – открытые континентальные склоны и 2 – системы подводных каньонов – конусов выноса. К открытым континентальным склонам относятся склоны с углами наклона 3–4° и относительным превышением в первые километры. Типичными открытыми континентальными склонами являются, например, склоны атлантического побережья США и западного побережья Африки.

В соответствии с этой характеристикой в исследуемом районе к обстановке открытых континентальных склонов можно отнести участок склона к востоку от хребта Терпения и западный склон хребта Терпения. К этой обстановке был также отнесен участок, включающей в себя Северо-Хоккайдское краевое плато, поскольку на некоторые осложнения его морфологии, средний наклон склона равен здесь 4°. На этих участках были частично закартированы подводные оползни, характерными чертами которых являются их

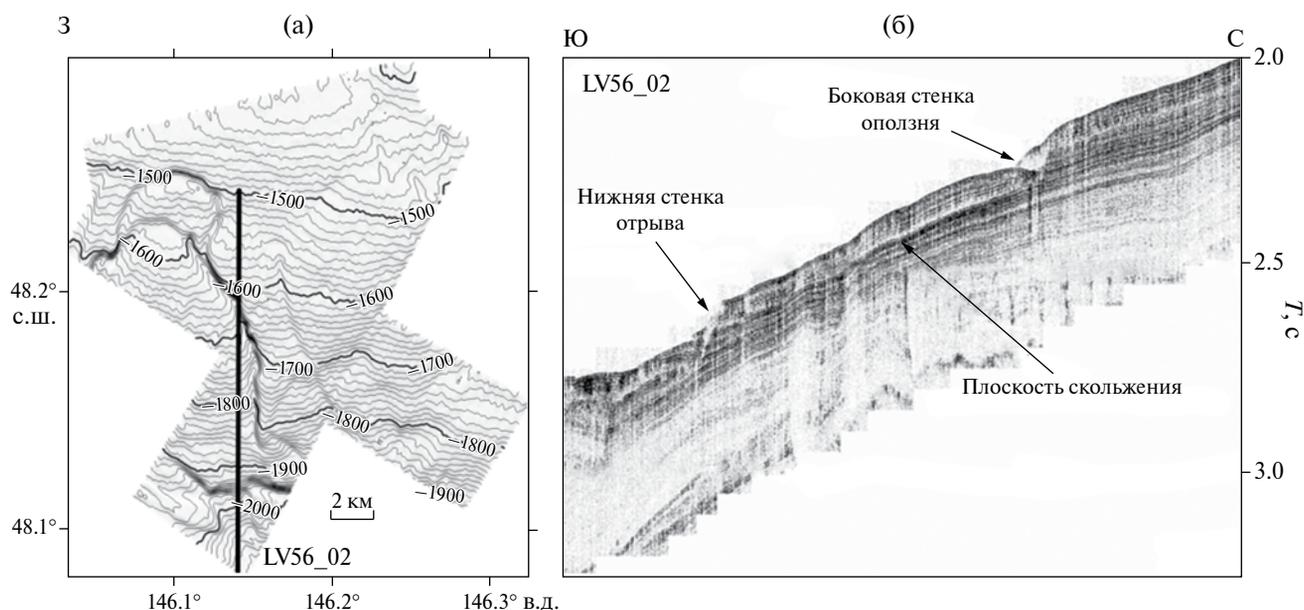


Рис. 5. (а) – Батиметрическая карта полигона к востоку от хребта Терпения. Съемка выполнена многолучевым эхолотом SIMRAD EM 120 (проект КОМЕХ), сечение изобат 10 м. (б) – Сейсмический разрез, пересекающий боковую стенку и нижнюю стенку отрыва оползня (проект SSGH); положение профиля показано на рис. 5а. Положение полигона см. рис. 16.

значительные размеры, превышающие 100 км^2 (рис. 6а). Оползни имеют сложную морфологию с наличием стенок отрыва на разных глубинах и, по всей видимости, состоят из нескольких оползневых тел, формирование которых происходило в различные временные интервалы.

Обстановка подводных каньонов и конусов выноса соответствует участку склона залива Терпения. В его пределах были выделены оползневые блоки с поперечными размерами до 2 км и отложения перемещенных масс (рис. 6а). Крупных оползневых тел обнаружено не было, что, вероятно, связано со значительной дезинтеграцией материала при его перемещении вниз по крутым бортам каньонов.

Качественный вывод о небольших размерах оползневых тел в обстановке каньонов – конусов выноса на западном склоне Курильской котловины согласуется с данными, которые были получены, например, для континентального склона атлантического побережья США [15, 18]. В этом районе количество оползней в каньонах составляет 30% от общего числа оползней, в то время как доля их

площадей и объемов равна 6.5 и 7.1% соответственно, т.е. оползни в каньонах являются менее крупным по сравнению с оползнями открытого склона.

6.2 Триггерные механизмы. В работе [17] выделяется девятнадцать триггерных механизмов, которые могут приводить к обрушению склона. Среди них сейсмические триггерные механизмы являются наиболее значимыми, и землетрясение даже умеренной магнитуды может вызвать обрушение склона с образованием оползня.

Восточный склон острова Сахалин, включая его южную часть, обращенную к Курильской котловине, располагается вблизи активной границы плит, которая проходит вдоль о. Сахалин и трассируется эпицентрами землетрясений (рис. 6б). В пределах района исследований эпицентры землетрясений концентрируются на шельфе залива Терпения и на перегибе шельфа вблизи Тонино-Анивского полуострова. На склоне эпицентры землетрясений немногочисленны, однако магнитуда одного из них превышала 5.0, т.е. оно являлось достаточно сильным событием. Землетрясения, происходящие в Сахалинской сейсмической зоне, являются

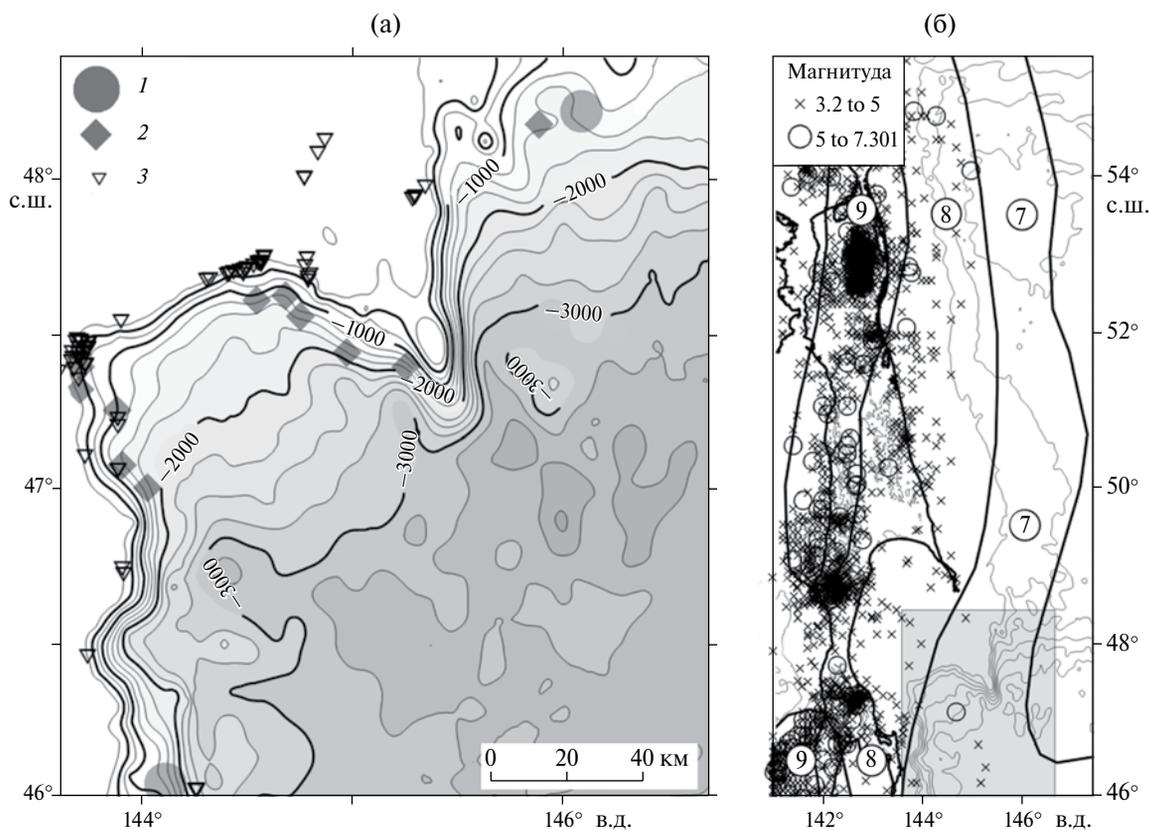


Рис. 6. (а) – Местоположение оползней и отложений перемещенных масс на западном склоне Курильской котловины. 1 – оползни площадью более 100 км^2 , 2 – оползневые блоки или отложения перемещенных масс, выделенные по единичным пересечениям, 3 – газовые факелы. (б) – Эпицентры мелкофокусных землетрясений с 1905 по 2014 гг. [6, 13] и изолинии сейсмической интенсивности в баллах шкалы MSK-64 [5]. Район исследований показан прямоугольником серого цвета.

мелкофокусными, поэтому даже слабые толчки (с магнитудой менее 4.0) вызывают значительные колебания грунта. На карте общего сейсмического районирования Северной Евразии ОСР-97 [5] шельф залива Терпения и Тонино-Анивского полуострова входит в 8-ми бальную зону, а западный склон Курильской котловины соответствует 7-ми бальной зоне (рис. 6б). Сейсмические нагрузки, возникающие при данных значениях интенсивности, являются достаточными для обрушения склона, как это было показано с помощью одномерного и двухмерного моделирования [3].

Разложение газогидратов, приводящее к высачиванию газа и соответствующему увеличению порового давления в осадках, также рассматривается как один из основных триггерных механизмов обрушения склона [17]. Разложение газогидратов может происходить при изменении РТ условий, связанных с изменением уровня моря и колебаниями температуры воды. Оценка вероятности этого процесса в качестве триггерного механизма была выполнена для оползня возрастом около 20 тыс. лет, расположенного в северной части восточного склона о. Сахалин. Возраст оползня совпадает со временем максимума последнего оледенения (LGM), когда уровень моря был ниже на 130 м относительно современного, что привело к снижению давления и разложению газогидратов [24].

Триггерный механизм обрушения склона за счет разложения газогидратов, приводящего к высачиванию газа и соответствующему увеличению порового давления в осадках, можно предполагать для курильского склона о. Сахалин. Это предположение подтверждается наличием газогидратов в осадочных колонках, отобранных на глубинах 725 и 1050 м [27]. На шельфе и склоне этого района (рис. 6а) было также зарегистрировано множество гидроакустических аномалий (газовых факелов), вызванных высачиванием газа и свидетельствующих о газонасыщенности осадочной толщи.

6.3 Возможность генерации оползневых цунами.

Оползни являются потенциальными геологическими опасностями по ряду причин, в том числе из-за их способности генерировать волну цунами. По сравнению с цунами сейсмического происхождения, оползневые цунами обычно имеют локальный характер, но по своей разрушительной силе они могут быть сопоставимы с цунами, вызываемыми землетрясениями [34]. Цунами известны на восточном побережье о. Сахалин. Для периода инструментальных наблюдений все они имели небольшую высоту (до 1.5 м) и были связаны с землетрясениями Курило-Камчатской дуги и более отдаленными событиями, произошедшими в Чили и Перу [22]. Данные о генерации волн цунами оползнями на восточном склоне о. Сахалин

отсутствуют и поэтому модельные оценки возможности наводнений, связанных с оползневыми цунами, представляют несомненный интерес.

Подобного рода оценка была выполнена для оползня объемом около 4 км^3 в центральной части восточного склона о. Сахалин. В результате модельного расчета максимальных высот цунами (A_{max}) было получено, что опасный накат волны цунами высотой до 15–20 м мог проявиться на участке восточного побережья о. Сахалин шириной до первых десятков километров [1, 4].

Наличие в изученном районе подводных оползней с возрастом от голоцена до среднего плейстоцена дает основание прогнозировать возможность дальнейшего обрушения склона и с образованием оползней, которые могут генерировать цунами. При этом наибольшие высоты цунами, вероятно, будут генерироваться в областях открытого континентального склона, где были обнаружены крупные оползневые тела.

7. ВЫВОДЫ

Батиметрические и сейсмические данные, полученные в рамках двух международных проектов КОМЕХ и SSGH, были использованы для изучения подводных оползней на западном склоне Курильской котловины. В результате установлено, что в данном районе эти образования встречаются повсеместно и различаются по своим размерам и особенностям. Выделяются крупные оползни, размеры которых превышают 100 км^2 , оползневые блоки с горизонтальными размерами до 2 км, и отложенные перемещенных масс.

Крупные оползни приурочены к обстановке открытых континентальных окраин, таких как склон Северо-Хоккайдского краевого плато и склон котловины к востоку от хребта Терпения. Оползневые блоки и отложения перемещенных масс приурочены к обстановке подводных каньонов – конусов выноса залива Терпения. Оползневые блоки приурочены к бортам каньонов, отложения перемещенных масс заполняют их русла.

Обрушение склона в обстановках подводных каньонов – конусов выноса и открытых континентальных окраин склона Курильской котловины провоцируется сейсмической активностью на западной границе Охотской плиты и газонасыщенностью осадков. Наличие разновозрастных оползней на склоне Курильской котловины дает основание прогнозировать возможность его дальнейшего обрушения с образованием волн цунами. При этом наибольшую опасность, по всей видимости, представляют области открытого континентального склона, где были обнаружены наиболее крупные оползневые тела.

Авторы благодарят участников научных экспедиций, выполненных в рамках проектов КОМЕХ в 1996–1999 гг. и SSGH в 2010–2015 гг. за помощь в получении батиметрических и сейсмических данных. Экспедиционные работы проводились при финансовой поддержке германско-российского проекта КОМЕХ и корейско-российско-японского проекта SSGH.

Настоящая работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО № 0149-2018-0015 (исследование оползневых тел) и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-50-00095 (определение триггерных механизмов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Б.В., Лобковский Л.И., Куликов Е.А. и др. Оползни на восточном склоне о. Сахалин как источник возможных цунами // Докл. РАН. 2013. Т. 449. № 3. С. 334–337.
2. Вебсайт геологической службы США (USGS), проект SRTM: <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM>.
3. Ионов В.Ю., Калинин Э.В., Фоменко И.К. и др. Условия формирования подводных оползней в отложениях бровки континентального склона Черного моря в районе поселка Архипо-Осиповка // Инженерная геология. 2012. № 5. С. 36–46.
4. Куликов Е.А., Иванова А.А., Баранов Б.В. Генерация цунами подводными оползнями // IV Международная научно-практическая конференция “Морские исследования и образование: MARESEDU-2015”. Сборник тезисов. М.: МГУ, 2015. С. 33–37.
5. Общее сейсмическое районирование Северной Евразии. ОСР-97. Карты А, В и С. м-б 1:8000000 / Под ред. Уломова В.И. М.: ИФЗ РАН, 2000. 3 л.
6. Поплавская Л.Н., Иващенко А.И., Оскорбин Л.С. и др. Региональный каталог землетрясений о. Сахалин 1905–2005. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.
7. Прокудин В.Г. К вопросу о возрасте отложений чехла Курильской котловины Охотского моря // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34. № 3. С. 65–77.
8. Родников А.Г., Забаринская Л.П., Рашидов В.А., Сергеева Н.А. Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин. М.: Научный мир, 2014. 171 с. ISBN 978-5-91522-392-8.
9. Сваричевский А.С. Геоморфология южной части Хоккайдо-Сахалинской подводной окраины // Геологическое строение Охотоморского региона. Владивосток: ДВНЦ, 1982. С. 65–75.
10. Сваричевский А.С. Рельеф дна Охотского моря // Проблемы морфотектоники Западно-Тихоокеанской переходной зоны / Под ред. Казанского Б.А. ТОИ ДВО РАН. Владивосток: Дальнаука, 2001. С. 82–97. ISBN 5-8044-0224-2.
11. Терехов Е.Р., Можеговский А.В., Горювая М.Т. Вещественный состав пород котиковской серии и основные эпизоды развития хребта Терпения в позднем мелу-палеогене // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29. № 3. С. 97–110.
12. Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 275 с.
13. ANSSComCat, Composite Earthquake Catalog (Northern California Earthquake Data Center). Berkeley, 2014. <http://www.quake.geo.berkeley.edu/cnss/>
14. Barley B. Deepwater problems around the world // Lead. Edge. 1999. V. 18. P. 488–494.
15. Booth J.S., O’Leary D.W., Popenoe P., Danforth W.W. U.S. Atlantic continental slope landslides: their distribution, general attributes, and implications // Submarine landslides: Selected studies in the U.S. Exclusive Economic Zone / Eds. Schwab W.C. et al. U.S. Geological Survey Bulletin. 1993. № 2002. P. 14–22.
16. Campbell K.J. Deepwater geohazards: how significant are they? // Lead. Edge. 1999. V. 18. № 4. P. 514–519.
17. Cannals M., Lastras G., Urgeles R. et al. Slope failure dynamics and impacts from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: case studies from the COSTA project // Marine Geology. 2004. V. 213. P. 9–72.
18. Chaytor J.D., Brink U.S., Solow A.R., Andrews B.D. Size distribution of submarine landslides along the U.S. Atlantic margin // Marine Geology. 2009. V. 264. P. 16–27.
19. Cruise Report SO178–КОМЕХ. Mass exchange processes and balances in the Okhotsk Sea. GEOMAR Report / Eds. Dullo W. – Chr. et al. Kiel: GEOMAR, 2004. 125 p.
20. European Margin Sediment Dynamics, Side-Scan Sonar and Seismic Images / Eds. Mienert J., Weaver P.P.E. Berlin: Springer-Verlag, 2002. 309 p.
21. Gribidenko H.S., Hilde T.W.C., Gretskeya E.V. et al. Kurile (South Okhotsk) back-arc basin // Back-Arc Basins: Tectonics and Magmatism / Ed. Taylor B. New York: Plenum, 1995. P. 421–449.
22. Gusiakov V.K. WinITDB (Integrated Tsunami Database for the World Ocean), Version 5.16 of December 31, 2010. CD-ROM. Novosibirsk: Tsunami Laboratory, ICMMG SD RAS, 2010.
23. Hampton M.A., Lee H.J., Locat J. Submarine Landslides // Reviews of Geophysics. 1996. V. 34. № 1. P. 33–59.
24. Kim Y.-G., Lee S.-M., Jin Y.K. et al. Near-seafloor gas hydrate occurrence in shallow water at the northeastern continental slope of Sakhalin Island, Sea of Okhotsk: implications for slope failure by gas hydrate dissociation

- due to ocean warming // *Marine and Petroleum Geology*. 2013. V. 45. P. 198–207.
25. *McAdoo B.G.* Mapping Submarine Landslides // *Research Monographs in Geographic Information Systems series* / Ed. Fisher P. UK: Taylor and Francis Publishers, 1999. P. 189–205.
 26. Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2011, R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 56 / Eds. Shoji H. et al. Kitami: New Energy Resources Research Center, Kitami Institute of Technology, 2012. 140 p.
 27. Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2012, R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 59 / Eds. Jin Y.K. et al. Incheon: Korea Polar Research Institute, 2013. 163 p.
 28. Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2013, R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 62 / Eds. Shoji H. et al. Kitami: Environmental and Energy Resources Research Center, Kitami Institute of Technology, 2014, 110 p.
 29. Operation Report of Sakhalin Slope Gas Hydrate Project II, 2015, R/V Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 70 / Eds. Minami H. et al. Kitami: Kitami Institute of Technology, 2016. 119 p.
 30. Ormen Lange – an integrated study for the safe development of a deep-water gas field within the Storegga Slide Complex, NE Atlantic continental margin / Solheim A. et al. (Eds.) // *Marine and Petroleum Geology*. 2005. V. 22. № 1–2. P. 1–318.
 31. *Riegel S.A., Fujita K., Kozmin B.M. et al.* Extrusion tectonics of the Okhotsk Plate, northeast Asia // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20(7). P. 607–610.
 32. Submarine Mass Movements and Their Consequences / Eds. Locat J., Mienert J. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Acad. Publ., 2003. 540 p.
 33. Submarine Mass Movements and Their Consequences / Eds. Yamada Y. et al. // *Advances in Natural and Technological Hazards Research*. 2012. V. 31. P. 55–66.
 34. *Tappin D.R.* Mass transport events and their tsunami hazard // *Submarine Mass Movements and Their Consequences* / Eds. Mosher D.C. et al. // *Advances in Natural and Technological Hazards Research*. Amsterdam: Springer, 2010. V. 28. P. 667–684.
 35. *Wong H.K., Lüdmann T., Baranov B.V. et al.* Bottom current-controlled sedimentation and mass wasting in the north-western Sea of Okhotsk // *Marine Geology*. 2003. V. 201. P. 287–305. doi:10.1016/S0025-3227(03)00221-4.

Submarine Landslides on Western Kurile Basin Slope, Okhotsk Sea

B. V. Baranov, V. G. Prokudin, Y. K. Jin, K. A. Dozorova, D. D. Rukavishnikova

Landslide processes on the western slope of the Kurile basin were investigated using bathymetry and seismic data obtained in frames of KOMEX and SSGH international projects. Slope areas containing landslides, landslide blocks and mass-transport deposits were distinguished. Large-scale landslides occupying over 100 km² are observed in area of open continental margins such as slopes of North-Hokkaido marginal plateau and Terpeniya Ridge. Landslide blocks up to 2 km in size and mass-transport deposits are located in areas of submarine canyons-fans in the Terpeniya Bay. Landslide age is estimated as Middle Pleistocene – Holocene. Landslides are most likely triggered by seismic activity and gas saturation of sediments. Further slope failure seems to be quite probable and landslides capable to generate tsunami waves may occur within the study area.