

## ФЛЮИДРАЗГРУЗКА КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ СУБАКВАЛЬНОГО ОПОЛЗНЯ «КРАСНОЯРСКИЙ», ОЗЕРО БАЙКАЛ

Артур Алиевич Кудяев<sup>1</sup>✉, Григорий Георгиевич Ахманов<sup>2</sup>,  
Олег Михайлович Хлыстов<sup>3</sup>, Олеся Николаевна Видищева<sup>4</sup>,  
Марина Андреевна Соловьева<sup>5</sup>, Дмитрий Вячеславович Корост<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Учебно-научный Центр ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике, Москва, Россия; a.a.kudaev@gmail.com

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Учебно-научный Центр ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике, Москва, Россия; akhmanov@geol.msu.ru

<sup>3</sup> Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия; oleg@lin.irk.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Учебно-научный Центр ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике, геохимик, Москва, Россия; vid6877@yandex.ru

<sup>5</sup> ООО «Деко-Геофизика»; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; marina-sol@yandex.ru

<sup>6</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Учебно-научный Центр ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике, Москва, Россия; dkorost@mail.ru

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований оползня Красноярский, расположенного в аванделте р. Селенга на дне оз. Байкал. К изучению оползня был применен мультидисциплинарный подход, включающий в себя сейсмоакустические, литологические, газогеохимические и физико-механические исследования. Полученный материал исследований оползня Красноярский и окружающих объект грунтов позволил выдвинуть гипотезу формирования оползня, согласно которой, роль ключевого фактора активизации гравитационного процесса, на ряду с сейсмичностью, играла высокая газонасыщенность донных отложений. Предложенный подход к изучению озерных и морских отложений может быть применен как при оценке их устойчивости, так и при поисках зон флюидоразгрузки на дне акваторий, связанных с месторождениями углеводородов в осадочной толще или, в частности, при картировании зон деградации реликтовой многолетней мерзлоты, под которой нередко могут формироваться скопления газов.

**Ключевые слова:** субаквальный оползень; гравитационные процессы; метан донных отложений; газонасыщенные грунты; озеро Байкал

**Для цитирования:** Кудяев А.А., Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М., Видищева О.Н., Соловьева М.А., Корост Д.В. Флюидоразгрузка как фактор формирования субаквального оползня «Красноярский», озеро Байкал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 2. С. 66–78.

## FOCUSED FLUID DISCHARGE AS SUBAQUEOUS LANDSLIDING FACTOR, AN EXAMPLE OF KRASNOYARSKIY LANDSLIDE, THE LAKE BAIKAL

Artur A. Kudaev<sup>1</sup>✉, Grigori G. Akhmanov<sup>2</sup>, Oleg M. Khlystov<sup>3</sup>,  
Oles'ya N. Vidischeva<sup>4</sup>, Marina A. Solovyeva<sup>5</sup>, Dmitry V. Korost<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University; UNESCO-MSU Training and Research Center for Marine Geology and Geophysics, Moscow, Russia; a.a.kudaev@gmail.com

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University; UNESCO-MSU Training and Research Center for Marine Geology and Geophysics, Moscow, Russia; akhmanov@geol.msu.ru

<sup>3</sup> Limnological Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Science, Irkutsk, Russia; oleg@lin.irk.ru

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vid6877@yandex.ru

<sup>5</sup> LLC «Deco-Geophysics», Moscow, Russia; marina-sol@yandex.ru

<sup>6</sup> Lomonosov Moscow State University; UNESCO-MSU Training and Research Center for Marine Geology and Geophysics, Moscow, Russia; dkorost@mail.ru

**Abstract.** There are represented results of Krasnoyarskiy subaqueous landslide researches in this paper. Landslide is located at subaqueous part of delta of the Selenga river. A multidisciplinary approach was applied to the study of the landslide, including seismo-acoustic, lithological, gas-geochemical and geotechnical studies. Obtained data from landslide and surrounding soils allowed to put forward a hypothesis, whereby a key factor to landslide origin was high gas saturation of the soils and reason of landslide was an earthquake. The proposed approach to the studying of bottom soils in lakes and seas can be applied both in assessing their stability and in searching for focus fluid discharging zones at the bottom in areas associated with hydrocarbon deposits in the sedimentary section. Also, approach can be applied in mapping of permafrost melting in Arctic region offshore, where gases are often accumulating below it.

**Keywords:** subaqueous landslide; gravitational processes; methane of bottom deposits; gassy soils; the Lake Baikal

**For citation:** Kudaev A.A., Akhmanov G.G., Khlystov O.M., Vidischeva O.N., Solovyeva M.A., Korost D.V. Focused fluid discharge as subaqueous landsliding factor, an example of Krasnoyarskiy landslide, the Lake Baikal. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 2: 66–78. (In Russ.).

**Введение.** Субаквальные гравитационные процессы характеризуются относительно большим масштабом по сравнению с континентальными, что немаловажно учитывать при изысканиях на акваториях. Кроме того, донные отложения акваторий, на которых проводятся геологоразведочные работы, часто характеризуются наличием в них углеводородных газов (например, метана). Таким образом, учет влияния газонасыщенности осадков на их устойчивость необходим при изучении физико-механических свойств донных грунтов.

Анализ литературных данных показал, что с середины XX в., когда началось интенсивное освоение шельфа, стала очевидна актуальность проблемы влияния газовой составляющей донных отложений на их устойчивость. Например, в 1970-х годах по результатам исследований морфологии дельты р. Миссисипи были обнаружены оползневые цирки различных формы и размера, образованные на склонах дна с крутизной от 0,14 до 0,22 градусов при глубине от 9 до 15 м [Prior, Coleman, 1978]. В работе [Whelan et al., 1976] установлено, что к важнейшим факторам формирования гравитационных процессов при таком уклоне склона относятся слабая консолидированность осадков, связанная с высокой скоростью седиментации, наличие газа в осадках, как в растворенном виде, так и в свободной пузырьковой фазе. Кроме того, в работе [McIver, 1982] предложена модель образования субаквальных гравитационных процессов, в которой ключевую роль играет диссоциация газовых гидратов. Позднее, в работах [Kaminski et al., 2020; Wheeler, 1986; Zhang et al., 2021] была доказана зависимость между количеством и фазовым состоянием газа в грунте и его напряженным состоянием. Так, по мере увеличения количества пузырьков газа в пустотном пространстве грунта снижается угол внутреннего трения ( $\phi$ ).

Яркий пример, иллюстрирующий тесную взаимосвязь устойчивости склоновых отложений и близко расположенного скопления углеводородных газов — гигантский подводный оползень Сторегга [Bugge et al., 1988], развитый на континентальной окраине Норвегии.

Изучение влияния повышенной концентрации газов в грунтах на устойчивость склоновых отложений и признаков, которые могут указывать на это влияние, имеет важное практическое значение, которое можно сформулировать в следующих положениях:

– разработка методических подходов к инженерно-геологическим изысканиям на акваториях, для которых характерно развитие зон фокусированной флюидоразгрузки;

– поиск зон фокусированной флюидоразгрузки, связанных с миграцией углеводородов из залежей, сформированных в осадочном разрезе;

– оконтуривание областей деградации реликтовой многолетней мерзлоты, которая нередко может служить флюидоупором для скоплений углеводородных газов.

Байкал — самый глубоководный и наиболее древний пресноводный водоем планеты, по всем характеристикам сопоставимый с морями, и это единственное озеро, в осадках которого были обнаружены скопления природных газовых гидратов. Для донных отложений Байкала характерно относительно высокое (10 мл/л) содержание растворенного метана преимущественно биогенного происхождения [Granin et al., 2010], а также многочисленные зоны фокусированной флюидоразгрузки [Cuylaerts et al., 2012; Khlystov et al., 2013]. Скопления газовых гидратов обнаружены в Южной и Центральной котловинах озера, как в придонных участках (сипы, грязевые вулканы, гидратные холмы [Хлыстов и др., 2011]), так и на глубине до 161 м ниже дна [Khlystov et al., 2013]. Верхняя граница стабильности газовых гидратов определяется глубиной воды в 350–400 м (в зависимости от температуры придонных вод, наличия аномального теплового потока) [Дучков, 2003] и подтверждена неоднократными наблюдениями, когда при подъеме трубки, содержащей осадки с газовыми гидратами, содержимое трубки начинало резко испускать пузыри в водную толщу, что фиксировалось на эхолоте или, как это было продемонстрировано в работах коллектива Class@Baikal на данных подводной видеосъемки [Ахманов и др., 2018]. Нижняя граница зоны стабильности газогидратов совпадает с сейсмической границей BSR (Bottom Simulating Reflector) и достигает глубины более 450 м ниже дна [Гольмшток и др., 1997]. Разномасштабные подводные оползни расположены в зоне стабильности газовых гидратов. Исследование взаимосвязи газонасыщения донных отложений и оползневых процессов на озере Байкал является актуальным как для Байкала, так и для аналогичных морских придонных систем.

Цель работы — установление взаимосвязи между просачиванием углеводородных газов из гидратоносного сипа и повышенной газонасыщенностью донных отложений с гравитационными процессами на подводном склоне оз. Байкал.

**Общая характеристика района исследований.** Дельта и авандельта р. Селенга разделяет южную и среднюю котловины озера Байкал и формируют самостоятельный осадочный комплекс площадью около 5000 км<sup>2</sup> [Кузьмин, 2000; Сорокикова и др., 2009]. Район исследований приурочен к авандельте

р. Селенга. Рельеф авандельты здесь пологий, углы наклона достигают 5 градусов. Строение поверхности дна авандельты осложнено гребнями и разделяющими их каналами, которые развиты у бровки авандельты и ниже по склону. Наиболее интенсивно и глубоко рельеф южного борта котловины озера нарушен в районе Посольской банки, где глубина врезания каньонов достигает 150–250 м, а длина вниз по склону местами достигает более 10 км. Главная особенность внешней части фронта авандельты Селенги в южной котловине — широко распространенные концентрические образования, достигающие в диаметре 8–9 км. Структуры имеют субвертикальные стены с максимальной высотой около 150–170 м. Основания структур имеют неровную поверхность с перепадом рельефа до 30–50 м [Хлыстов и др., 2016; Kononov et al., 2019]. Северная часть авандельты, в пределах Средней котловины озера, характеризуется более сложным рельефом. В районе Кукуйской гривы развиты крупные разновозрастные оползневые блоки [Сорокикова и др., 2009].

Подводный оползень Красноярский расположен на бровке авандельты р. Селенга в южной котловине озера Байкал. Объект был обнаружен в ходе анализа данных съемки многолучевым эхолотом, которые получены в рамках международного российско-бельгийского проекта, организованного Лимнологическим институтом Сибирского отделения Российской академии наук (ЛИН СО РАН, Россия) и Renard Centre of Marine Geology (RCMG, Бельгия) в 2009 г. Ранее, в 2007 г., в ходе геофизической экспедиции на научно-исследовательском судне «Г.Ю. Верещагин» были получены сонограммы западного склона авандельты р. Селенги в южной котловине оз. Байкал. На одном из изображений гидролокации бокового обзора (ГБО) напротив мыса Красный Яр были обнаружены три участка с аномально высоким сигналом обратного рассеяния, которые существенно не выделялись в рельефе [Granin et al., 2010]. В период с 2012 по 2015 г. геологическое опробование осадков в пределах аномалий позволило установить присутствие приповерхностных газовых гидратов [Хабуев и др., 2016]. Близкое расположение гидратоносных структур и оползневого тела на дне озера Байкал вызвало предположение о возможном влиянии активности флюидоразгрузки сипа на устойчивость склоновых отложений, наряду с высокой сейсмичностью региона.

В Байкальской рифтовой зоне в прошлом и сейчас фиксируются сотни разномасштабных землетрясений, некоторые из которых имели магнитуду  $M=7,7$  ( $I_0=10-11$  баллов) [Уломов, 1995; www.seisbukl.ru]. Кроме того, в распределении мест разгрузки углеводородных флюидов в осадочном чехле озера Байкал значимую роль играет активная неотектоника [Видищева и др., 2021].

В период с 2015 по 2019 г., в рамках экспедиций Class@Baikal [class-baikal.ru], организованных геологическим факультетом МГУ имени М.В. Ломоносова

(Москва) совместно с ЛИН СО РАН (Иркутск), в пределах распространения оползня Красноярский и сипа Красный Яр на НИС «Г.Ю. Верещагин» были выполнены геофизические и геологические исследования, результаты которых представлены в данной работе.

**Материалы и методы исследований.** Для поиска подходов к изучению оползня Красноярский и гидратоносного сипа Красный Яр была применена комплексная методика исследований, которая включает в себя следующие методы.

*Геофизические методы.* Основой для представления о строении оползня и прилегающих поверхностей дна служили данные съемки многолучевым эхолотом SEABEAM 1050 (частота сигнала 50 кГц; сектор обзора 120 градусов; 108 лучей), предоставленные ЛИН СО РАН и RCMG (программа РАН 17.8 (2009) и Проект FWO Flanders (1.5.198.09)).

Для детализации строения разреза авандельты был применен метод сейсмоакустического профилирования. Сейсмоакустическая съемка осуществлялась по методике непрерывного сейсмического профилирования, при скорости хода судна около 3,5 узлов. Источник сейсмических колебаний — многоэлектродный электроискровой (спаркер). Центральная частота возбуждаемого сигнала — 400 Гц, энергия источника — 1000 Дж. Регистрация велась одноканальной косой длиной 20 м из 40 пьезоприемников. Метод позволил установить строение разреза авандельты до глубин около 300 м с вертикальным разрешением 2 м.

*Геологические методы.* Для уточнения состава и строения осадков применялся метод донного гравитационного пробоотбора. Для пробоотбора использовались 3- и 5,5-метровые трубки. Всего на полигоне оползня Красноярский и одноименного сипа было выполнено 90 станций донного пробоотбора с суммарным выходом керна 220 м. На борту было выполнено первичное описание кернов и их фотодокументация. Литологический состав осадков, вскрытых в пределах полигона, был охарактеризован исходя из набортного описания керна и результатов изучения методом лазерной дифрактометрии для установления гранулометрического состава и методом рентгенофазового анализа для установления минерального состава.

*Инженерно-геологические методы.* В ходе набортного описания кернов грунтов замеряли физико-механические характеристики грунтов микрокрыльчаткой и карманным пенетрометром. Для грунтов, отобранных станциями TTR-BL17-255G, TTR-BL17-261G, TTR-BL17-264G TTR-BL19-441G, TTR-BL19-442G, TTR-BL19-443G, изучены физико-механические свойства в лабораториях МГУ имени М.В. Ломоносова и ИГЭ РАН имени Е.М. Сергеева [Кудаев и др., 2022]. Расчеты устойчивости склона выполнялись в ПО «Geo5». За основу конфигурации оползня взяты данные батиметрии и сейсмопрофилирования, на основании которых

Таблица 1

**Физические и физико-механические свойства грунтов района развития субаквального оползня Красноярский**

Номер станции	Наименование грунта	Гранулометрический состав							Влажность образца, %	Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	Пластичность			Показатель текучести	Прочностные свойства (одноосный сдвиг)			
		Содержание частиц различного размера, в мм, %									WL	WP	IP		С, кПа	φ, град.		
		1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	<0,005									<0,002	
TTR-BL17-261G	Глина текущая	0,7	1,9	0,9	5,2	4,8	29,9	6,4	50,2	64,6	1,66	56,2	31,4	24,8	1,34	8	1	
TTR-BL19-441G			0,8	0,3	6,2	6,3	19,8	12,4	54,2	67,4	1,53	52,8	31,6	21,2	1,69	34	5	
TTR-BL19-442G			0,4	2,1	0,7	8,4	8,7	22,4	14,8	42,5	77,2	1,64	61,3	34,5	26,8	1,59	28	7
TTR-BL19-443G			0,3	0,7	0,8	8,5	8,6	19,9	13,3	47,9	80,6	1,51	61,2	35,2	26,0	1,75	21	10

построены расчетные модели оползня. Далее были выбраны лабораторные значения физико-механических характеристик грунтов, и выполнен расчет устойчивости склона в разных сечениях (табл. 2), пересекающих полигон.

**Результаты исследований и их обсуждение.**

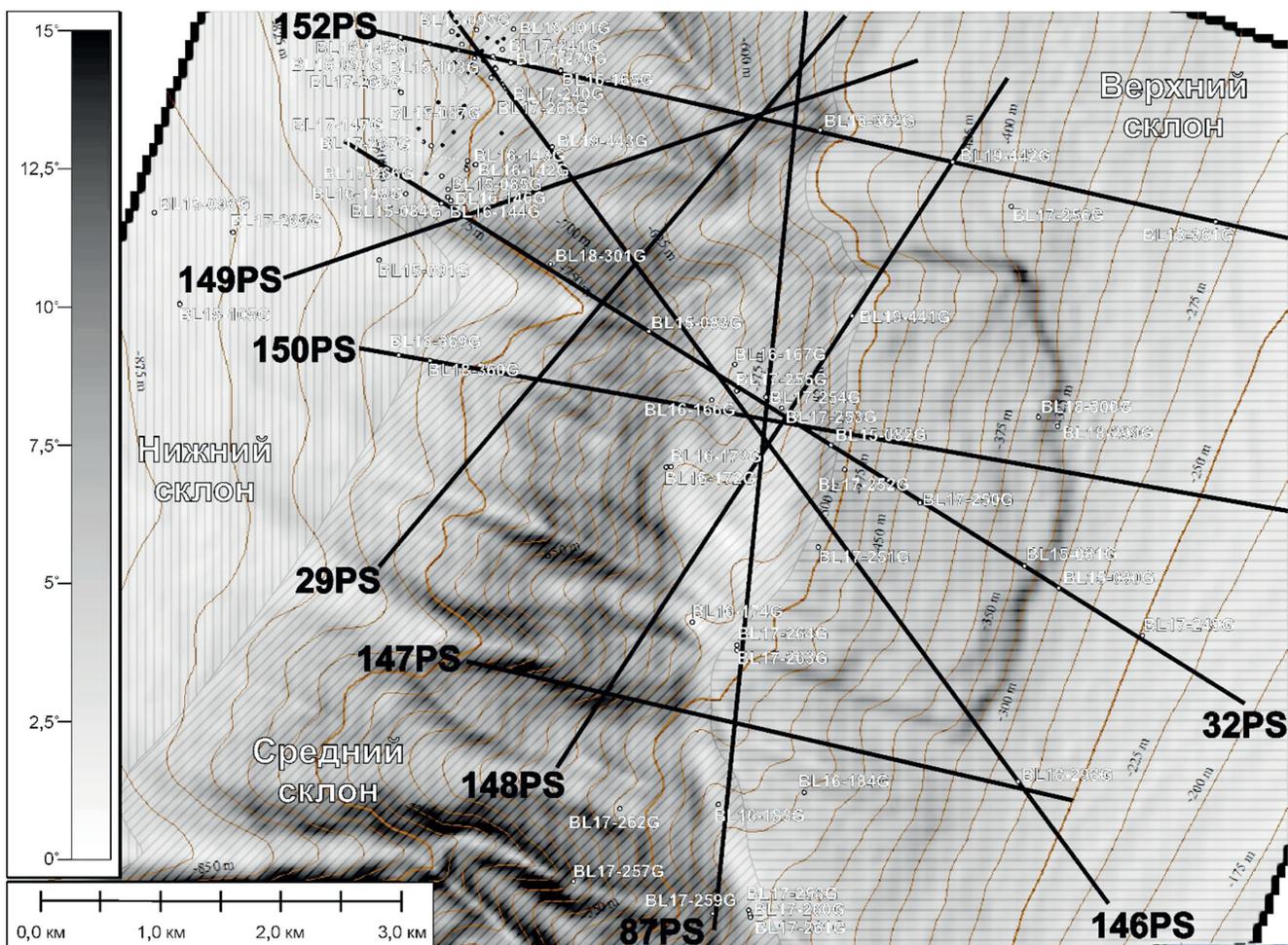
Анализ батиметрических данных показал, что в пределах полигона углы наклона дна варьируют от 1–2 до 15 градусов, в рельефе дна отчетливо выделяются плосконаклоненные участки дна, эрозионные врезы, крутые стенки оползневого амфитеатра. Сам оползень Красноярский идентифицируется в рельефе дна по:

– затронутой оползанием поверхности дна, которая имеет в плане трапецевидную форму с основанием, обращенным вверх по склону (рис. 1). На поверхности оползня скольжения прослеживаются эрозионно-денудационные элементы рельефа, присущие склону авандельты на изобатах 280–600 м, такие, как эрозионные каналы и хребты разделяющие эти каналы. Каналы направлены параллельно наклону поверхности дна и маркируют участки придонного транзита осадочного вещества, поставляемого рекой Селенга. Длина границ оползневого тела около 12 км, площадь 9,5 км<sup>2</sup>. Перепад глубин от стенки отрыва до области разгрузки 350 м. Объем

Таблица 2

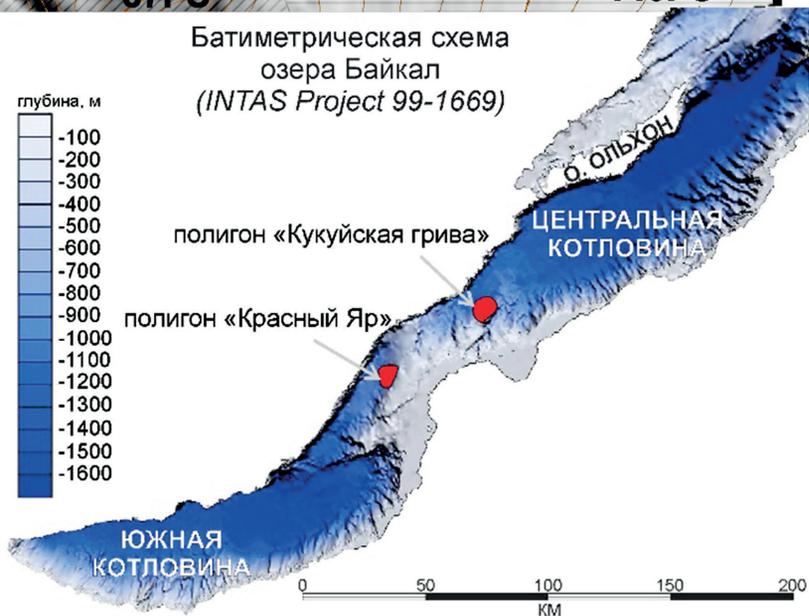
**Оценка устойчивости полигона оползня Красноярский**

Станция, №	Положение в пределах полигона (относительно оползня)	Структурная прочность $\sigma_{стр}$ , кПа	Бытовое давление $P_p$ , кПа	Деформации нагрузки в точке	Коэффициент запаса устойчивости (расчет по методу Шахунянца)
TTR-BL17-261G	Уступ возле передовой части оползня	16,27	54,6	Да	0,61
TTR-BL19-441G	Тело оползня	74,15	54,4	Нет	1,40
TTR-BL19-442G	Не затронутый оползанием склон	63,24	54,8	Нет	1,62
TTR-BL19-443G	Подножие оползня	50,01	54,6	Да	1,80



- верхний склон
- средний склон
- нижний склон
- сейсмический профиль
- станция донного пробоотбора

Рис. 1. Участки склона авандельты реки Селенга в районе развития оползня Красноярский. Градуированная шкала для карты — углы наклона дна. Сечение изобат 25 м



оползневого тела по данным батиметрии и сейсмопрофилированию составляет около  $0,28 \text{ км}^3$ ;

– стенкам отрыва, ограничивающих тело оползня от склона авандельты реки Селенга. Для оползня характерна головная стенка отрыва извилистой формы, ориентированная поперек склона, характеризующаяся углами наклона от 8 до 15 градусов, шириной от 80 до 150 м. Высота стенки отрыва достигает 20 м. Протяженность 4200 м, перепад глубины от северной

оконечности вершины стенки до южной вершины стенки составляет 70 м (глубина воды 330 м метров на юге, 400 м на севере). Боковая стенка отрыва, фиксируемая по северной стороне оползневого тела, ориентирована параллельно падению склона. Боковая стенка характеризуется углами наклона от 5 до 10 градусов, шириной от 50 до 120 м. Высота стенки достигает 15 м. Протяженность 1850 м, перепад глубин с востока на запад для вершины стенки

составляет 150 м (глубины воды от 400 до 550 м). В нижней части стенка отрыва оползня совпадает с боковой поверхностью одного из эрозионных каналов. Южная боковая стенка отрыва отсутствует, роль границы оползневого тела с южной стороны играет хребет, разделяющий эрозионные каналы склона;

– уступу, обращенному против склона авандельты, который расположен у подножия тела оползня. Уступ имеет наклон от 0 до 5 градусов, ориентированный на восток–северо-восток с азимутом от 45 до 90 градусов. Протяженность уступа составляет 1700 м, высота до 20 м, перепад глубин с юго-востока на северо-запад составляет 75 м (отметки глубин воды 525 м на юго-востоке, 600 м на северо-западе). С северо-западной оконечности поверхность уступа сливается со стенкой одного из эрозионных каналов.

Область разгрузки оползня выработана по одному из эрозионных каналов, характерных для склона авандельты. Канал выражен в рельефе крутыми стенками бортов на глубинах воды от 625 до 825 м. Ширина канала варьирует от 500 м в верхней части и устье, до 250 м в наиболее крутой, центральной части. Наклон стенок до 10 градусов.

На сейсмических разрезах выделены пять сейсмокомплексов (СК). Сверху вниз:

СК-2а — характеризуется параллельной слоистостью, имеющей волнообразную форму, частичную потерю корреляции между осями синфазности. Как правило, сейсмокомплекс характеризует отложения, слагающие аккумулятивные тела, мощность которых достигает 100 м (рис. 2, б);

СК-2б — характеризуется параллельно-слоистой, горизонтальной волновой картиной, выдержанными осями синфазности повышенными амплитудами сейсмического отражения. Характерна для крупных осадочных тел у подножия оползня, мощность которых 100–200 м и более (рис. 2, а, в);

СК-1а — характеризуется параллельной, хорошо выдержанной волновой картиной. Оси синфазности прослеживаются по всему участку склона, имеют наклон, совпадающий с уклоном дна. Мощность параллельно-слоистого сейсмического комплекса СК-1а достигает 200–250 метров (рис. 2, а, в);

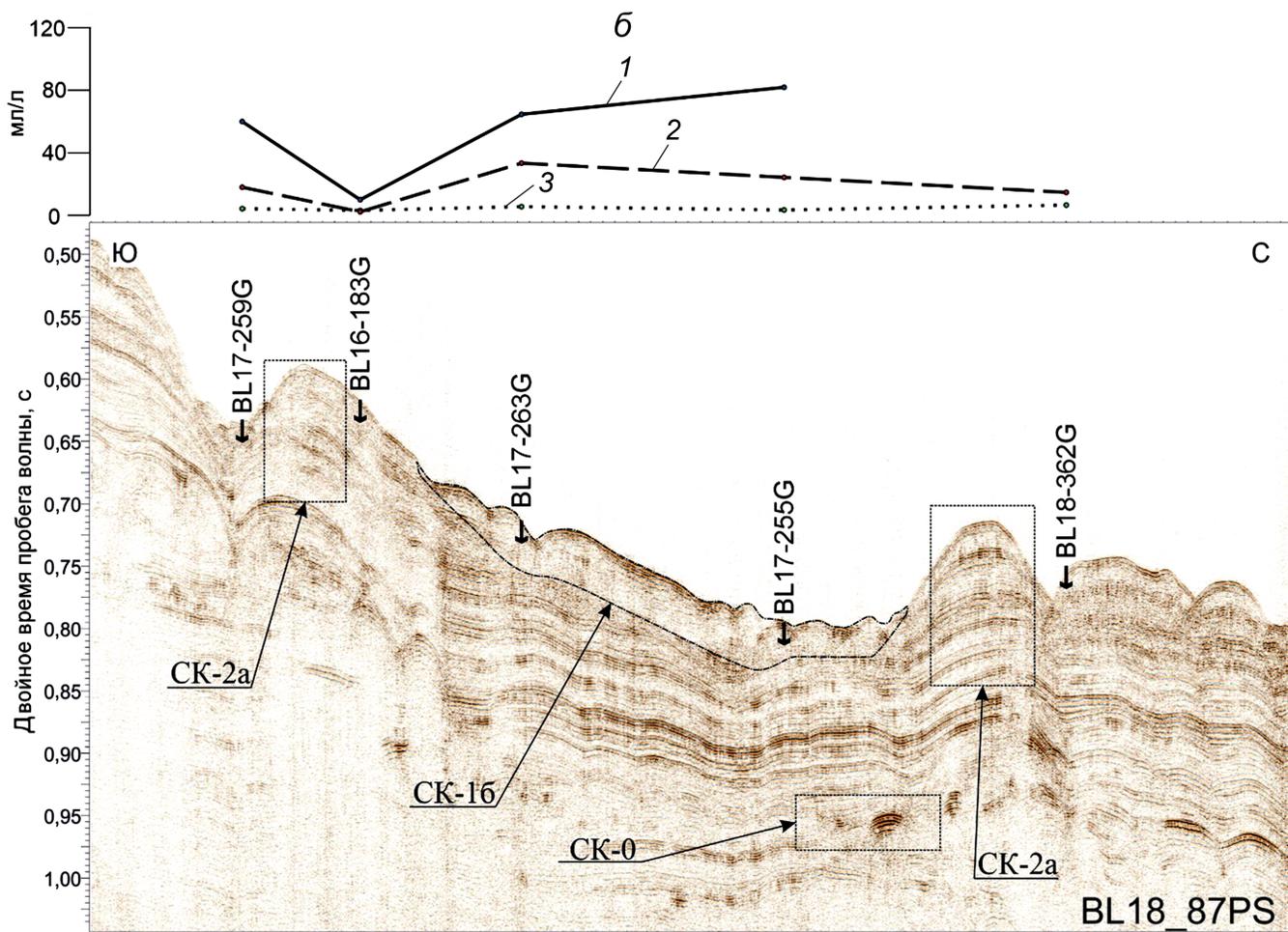
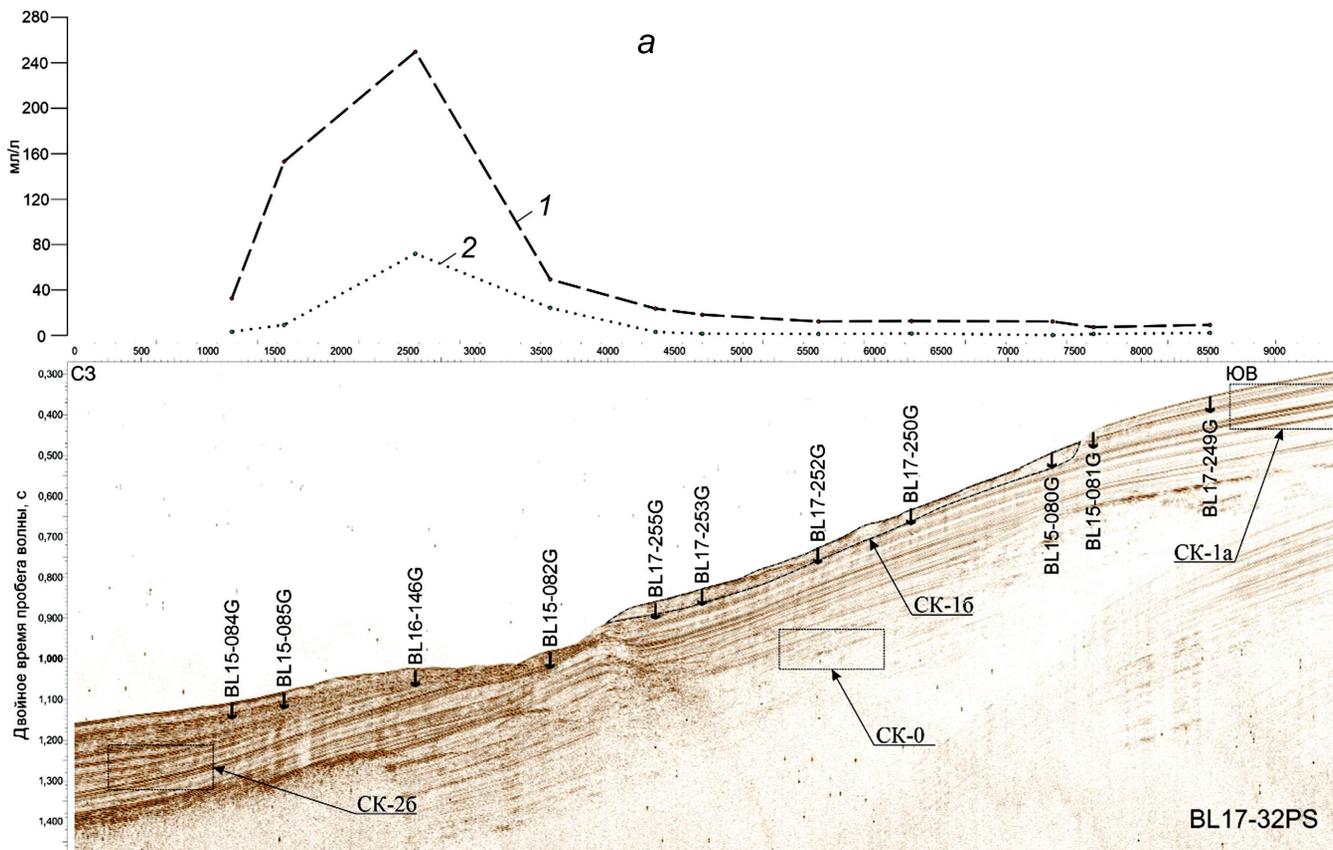
СК-1б — характеризуется хаотической волновой картиной, невыдержанными, рябыми осями синфазности, неравномерным распределением повышенной и пониженной амплитуды, по расположению в плане совпадающий с контурами оползня, выраженными в рельефе дна. Нижняя граница СК-1б с угловым несогласием залегает на СК-1а. Мощность СК-1б 25–30 метров (рис. 2, а, в);

СК-0 — характеризуется моноклиальной слоистостью, имеющей угол падения 1–2 градуса, относительно слабыми амплитудами сигнала, частичной потерей корреляции между осями синфазности (рис. 2, а, б). Для СК-0 характерны аномалии отраженных волн акустического сигнала типа «яркое пятно». Аномалии прослеживаются под областью распространения СК-1б на глубинах 200–300 м.

Разрез приповерхностных осадков представлен в верхней части глинисто-диатомовым и диатомово-глинистым илом мощностью от 13 до 243 см. Размерность частиц этого слоя преимущественно пелитовая с примесью алеврита. Минеральный состав представлен гидрослюдой (67–74%), хлоритом (9–13%), каолинитом (10–11%), смектитом (4–7%), смешанослойными глинистыми минералами (2–3%). Вскрытая мощность плейстоценовых алевритистых глин достигает более 3 м. Состав минералов пелитовой фракции представлен: гидрослюдой (27–48%), смешанослойными глинистыми минералами (15–20%), хлоритом (12–21%), смектитом (13–15%), каолинитом (10–19%).

В кернах станций в теле оползня TTR-BL15-081G, TTR-BL15-082G, TTR-BL15-091G, TTR-BL15-098G, TTR-BL15-104G, TTR-BL16-166G, TTR-BL16-167G, TTR-BL16-171G, TTR-BL16-176G, TTR-BL16-180G, TTR-BL17-252G, TTR-BL17-253G, TTR-BL17-255G, TTR-BL17-256G, TTR-BL17-258G, TTR-BL17-259G, TTR-BL17-263G, TTR-BL17-265G отмечены текстуры, нарушенные оползанием. Текстуры маркируются по более светлым оттенкам серого цвета волнистых, иногда напоминающих опрокинутые складки прослоев. В станциях TTR-BL15-091G, -098G, TTR-BL16-147G, -178G, TTR-BL17-249G, -251G, -265G, -269G выявлены тонкие прослои мелкозернистых песков. В станциях TTR-BL15-082G, TTR-BL15-087G, TTR-BL15-095G, TTR-BL17-257G отсутствует голоценовый глинисто-диатомовый ил в верхней части разреза. В некоторых станциях разрез представлен третьим элементом — глинисто-алевритовым илом, залегающим под алевритистыми плейстоценовыми глинами (станции TTR-BL17-250G, TTR-BL17-257G, TTR-BL17-262G).

Газогеохимическими исследованиями полигона оползня Красноярский изучены растворенные в поровых водах углеводородные газы, как для тела оползня и его периферии, так и для участков дна, на которых развит сип Красный Яр. Исследовано 68 станций с интервалом отбора проб в 30 см. Суммарное число изученных проб — 634 образца, для которых исследована концентрация растворенного в поровых водах метана и его гомологов методом газовой хроматографии. Область донных отложений, расположенная выше оползня, характеризуется содержанием метана, растворенным в поровых водах и в свободном состоянии, с концентрацией до глубины 300 см ниже дна, не превышающей 31 мл/л осадка. В станциях, вскрывающих осадки склона вокруг оползня и его стенки отрыва, концентрация метана достигают 70 мл/л. В зоне оползневого тела концентрация метана выше, чем в ненарушенном склоне, и достигает 88 мл/л. Отмечена тенденция к увеличению концентрации газа в северном направлении (вдоль боковой стенки отрыва) и в направлении к сипу Красный Яр. В целом для склона ниже оползня характерно резкое увеличение концентрации метана в осадке с глубины 300 см. Концентрация метана в



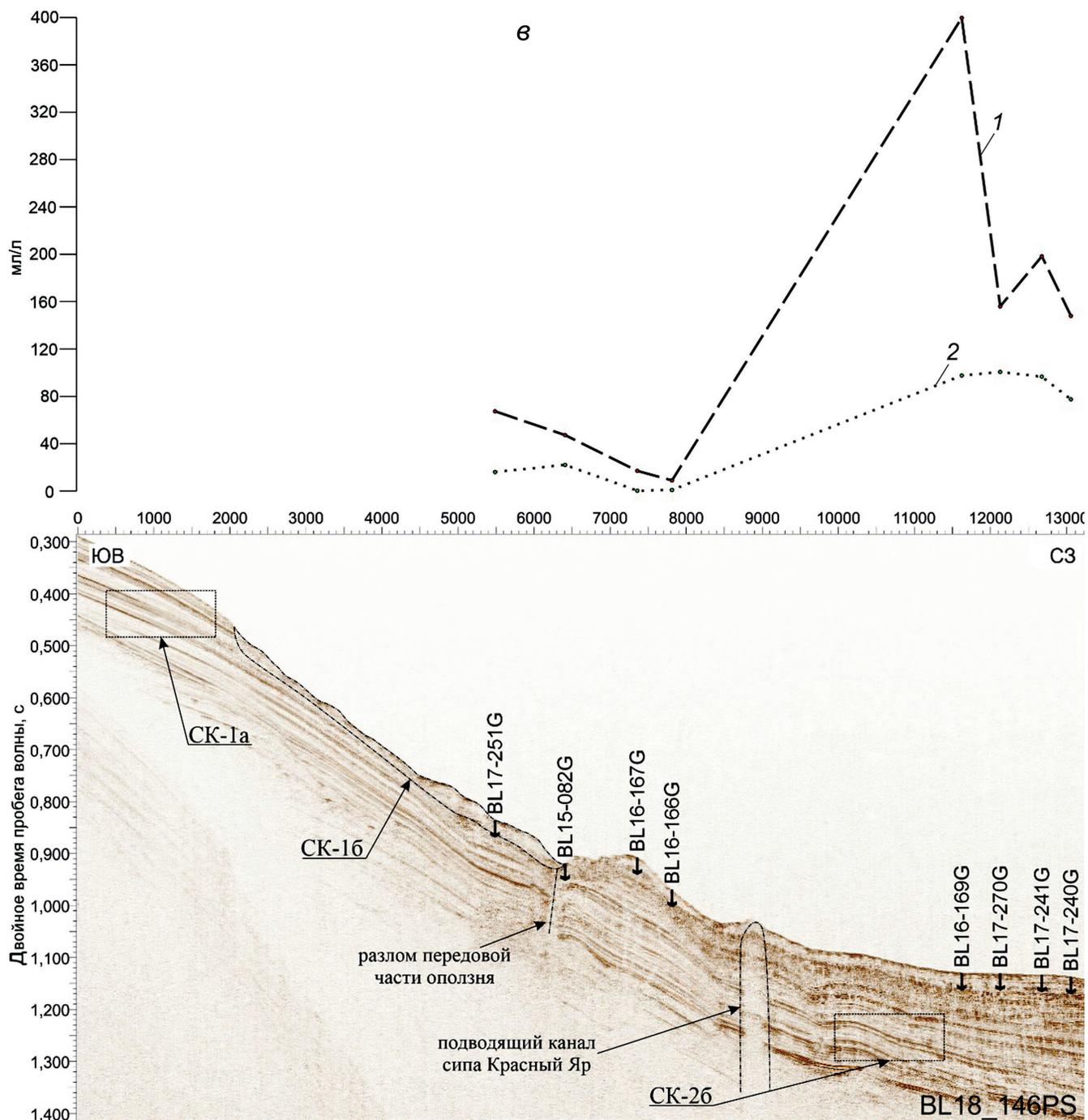


Рис. 2. Сейсмоакустические профили через тело оползня, с указанными станциями донного пробоотбора. На графике сверху указаны концентрации растворенного метана в осадках. Прямоугольниками выделены типичные для сейсмокомплексов участки профиля. Положение профилей на рис. 1. Пояснения в тексте

зоне сипа весьма высокая и достигает 370 мг/л. В некоторых станциях, расположенных в пределах сипа Красный Яр, вскрыты разрезы осадков, содержащие интервалы с газовыми гидратами [Хабуев и др., 2016]. Газовых гидратов в теле оползня и вокруг него не обнаружено.

В табл. 2 представлены результаты анализа устойчивости грунтов (структурная прочность, бытовое давление, деформации нагрузки в точке, коэффициент запаса устойчивости) в пределах развития оползневого тела (станция ТТR-BL19-441G, профиль BL17-32PS), ненарушенного оползанием

аккумулятивного склона (станция ТТR-BL19-442G, профиль BL18-146PS), уступа, расположенного у передовой части оползня (станция ТТR-BL19-261G, профиль BL18-87PS) и области конечного стока осадочного материала, в районе распространения сипа Красный Яр (станция ТТR-BL19-443G).

Сопротивления сдвигу, значения которых получены при полевых измерениях на склоне авандельты и у ее подножия микрокрыльчаткой и пенетрометром, равны 32–43 кПа и 15–40 кПа соответственно. Для других частей полигона средние значения со-

противления сдвигу варьируют в пределах 5–20 кПа и 2–12 кПа.

**Обсуждение.** Изучаемый полигон условно можно разделить на три участка (рис. 1), отличающихся друг от друга по уклонам поверхности дна, наличию осложняющих структур и характеру накопления осадочного материала.

К первому, верхнему, склоновому участку (верх склона) относится участок дна, который характеризуется ровным пологим рельефом, с углами наклона 2–3 градуса. Участок расположен между изобатами 175–500 м. В этой части склона начинают свое развитие эрозионные врезы, начиная с изобаты 350 м на севере и 250 м на юге полигона. В настоящее время на данном участке склона происходит гемипелагическое осадконакопление, что подтверждается вскрытыми разрезами станций донного пробобора, в которых практически отсутствуют грубозернистые примеси и есть верхний голоценовый слой диатомового ила. Разрез осадков представлен в верхней части диатомовыми илами мощностью 100–150 см, в нижней части глинами вскрытой мощностью от 160 до более чем 300 см. На разрезах сейсмоакустического профилирования это сейсмокомплекс СК-1а. В пределах этого же участка склона находится исследуемый оползень, который на сейсмических записях характеризуется как СК-1б. Судя по геофизическим данным, нижняя часть оползневого тела маркируется по угловому несогласию между СК-1б и СК-1а на глубинах 30 м. В основании сейсмического разреза СК-0 под областью распространения СК-1б на глубинах 200–300 м от дна присутствуют аномалии отраженных волн акустического сигнала типа «яркое пятно», которые указывают на наличие свободного газа в разрезе осадков под оползнем.

Второй условный участок склона (середина склона), расположен ниже оползневого тела на изобатах глубин в 500–750 м. Его характерная особенность заключается в расчлененности рельефа дна, обусловленной чередованием эрозионных каналов и разделяющих их хребтов. Наклон некоторых склонов хребтов достигает 15 градусов. Так, на ст. TTR-BL17-257G с этого участка дна вскрыт разрез более древний, чем окружающие отложения, отличающийся уплотненностью от окружающих отложений, которые вскрыты на склоне авандельты и у ее подножия. В частности, для осадков, вскрытых здесь, характерны сопротивления сдвигу, значения которого получено при полевых измерениях микрокрыльчаткой и пенетрометром, они составляют 32–43 кПа и 15–40 кПа соответственно. Для осадков, вскрытых в других частях полигона средние значения сопротивления сдвигу, измеренные соответствующими методами, варьируют в пределах 5–20 и 2–12 кПа соответственно. Все это говорит об отсутствии современного осадконакопления и вскрытии более плотных и древних осадочных толщ в пределах эрозионных врезов, что указывает на транзит вышележащих по склону оползневых масс и

размыв собственных рыхлых отложений. На сейсмических разрезах волновая картина осадочной толщи средней части склона характеризуется параллельной линзовидной слоистостью. Вблизи врезов в рельефе дна оси синфазности выклиниваются к поверхности (СК-2а, рис. 2, б). Вниз по склону, у оснований врезов сформированы аккумулятивные тела, характеризующиеся параллельно-слоистой, горизонтальной волновой картиной (СК-2б, рис. 2, а-в). Мощность таких тел достигает 90–100 м и уменьшается вверх по склону.

Третий условный участок склона (Низ склона) относится к наиболее глубоководной части полигона с характерным пологим наклоном поверхности дна (0–1 градуса), где происходит как гемипелагическое накопление, так и накопление сносимых с вышележащих склонов отложений: от отдельных линз и прослоев алевроитов и песков до оползневых блоков и мутьевых потоков, что подтверждается разрезами станций TTR-BL15-091G, TTR-BL15-098G, TTR-BL16-147G. На сейсмических профилях в строении осадочной толщи принимает участие описанный ранее СК-2б, однако на профилях, пересекающих сип Красный Яр, четко идентифицируются подводящие каналы, характеризующиеся акустически прозрачной волновой картиной. Сейсмокомплекс СК-2б в верхней части разреза частично перекрывает подводящий канал сипа, что указывает на существование фокусированной зоны флюидоразгрузки до формирования отложений, характеризующихся волновой картиной СК-2б, сформированных вследствие активизации оползневого процесса. (рис. 2, в).

Граница между верхом и серединой склона проведена по выраженному в рельефе уступу (рис. 1), область распространения которого на сейсмических профилях совпадает с зоной потери корреляции между осями синфазности, их смещением относительно субвертикальной поверхности, и, в некоторых случаях, хаотической волновой картиной, интерпретируемой нами как разлом (рис. 2, в).

Анализ разрезов, слагающих оползневое тело, показал, что в станциях TTR-BL15-082G, TTR-BL15-095G, TTR-BL17-257G отсутствует голоценовый глинисто-диатомовый ил в верхней части разреза, что, вероятно, указывает на участки современного оползания склона. Поскольку для оз. Байкал установлено, что нижняя граница диатомовых илов в современных отложениях маркируется возрастной границей плейстоцен-голоценового времени [Colman et al., 1996; Khlystov et al., 2013]. В соответствии с тем, что распространение диатомовых илов в пределах оползня неравномерное, можно сделать два предположения: во-первых, в настоящее время в придонной части оползня происходит мелкомасштабное оползание или, по крайней мере, транзит осадочного материала; во-вторых, возраст наиболее древнего гравитационного процесса, развитого в пределах оползня Красноярский, можно датировать исходя из того, что наиболее мощный прослой диа-

томовых илов залегают в подошве на плейстоценовых глинах.

Максимальная мощность диатомовых илов, вскрытая в пределах тела оползня Красноярский, составляет 180 см (вскрыта ст. TTR-BL17-253G). Согласно работе [Colman et al., 1996], скорость осадконакопления современных отложений в районе полигона Красный Яр составляет в среднем 15 см/1000 лет. Учитывая скорость гемипелагического осадконакопления в этом районе, мы предполагаем, что возраст гравитационного процесса составляет не менее 10000–12000 лет.

Для представления о миграции углеводородных газов в донных отложениях оз. Байкал важная особенность строения осадков полигона Красный Яр заключается в наличии субвертикальных текстур в осадках, которые представляют собой, предположительно, зону развития аутигенной минерализации, связанной с фокусированной разгрузкой углеводородов. Каналы первого типа распространены вблизи и непосредственно в очагах современной разгрузки метана, каналы второго типа встречаются на периферии таких зон [Кудаев и др., 2017]. Концепция миграции поровых вод из придонной части озера в осадок более подробно рассмотрена в исследовании [Aloisi et al., 2019; Pogodaeva et al., 2020]. Согласно этим исследованиям для зон фокусированной флюидоразгрузки, в частности для сипа Красный Яр, характерна миграция флюидов вверх по осадочному разрезу из трех потенциальных источников:

1) с глубоких горизонтов осадочного разреза мигрируют флюиды, для этих зон характерен повышенный теплопоток;

2) с глубины положения сейсмической границы BSR — 175–225 м ниже дна для района развития сипа Красный Яр — поступают газы от диссоциирующих газовых гидратов;

3) с глубины до 1,5 м происходит придонная фильтрация поровых вод из осадков.

В пределах развития сипа Красный Яр и вышележащего по склону Красноярского оползня в осадках отмечены типичные субвертикальные каналы, которые могут быть связаны с локальной разгрузкой газов [Кудаев и др., 2017; Pogodaeva et al., 2020]. Важно отметить, что такие каналы встречаются, как в теле оползня, так и вне его на большей площади. В теле оползня они могли сформироваться и в ходе мелко-масштабных оползаний (которые зафиксированы методом донного пробоотбора), но и при этом эти каналы сформированы вследствие флюидоразгрузки (или, по крайней мере, повышенным содержанием газа в осадках). Такие текстуры свидетельствуют о современной миграции флюидов в пределах развития зоны флюидоразгрузки и подчиненной ей области, где развито оползание склоновых отложений. Современная миграция флюидов вверх по склону допускает предположение о возможности такой миграции в прошлом, до формирования оползневого процесса на склоне авандельты. Положение оползня

именно выше по склону над сипом Красный Яр, а не в любом другом месте бровки авандельты, позволяет отнести газонасыщенность отложений здесь в прошлом к фактору формирования оползня.

Для установления источников углеводородных газов в сипе Красный Яр и в нарушенном склоне оползня, рассмотрим состав и распределение углеводородных газов в пределах изучаемого полигона. Так, анализ результатов газогеохимической съемки показал, что, в целом, для нижнего склона оползня характерно резкое увеличение концентрации метана в осадке с глубины 300 см (рис. 2, а), что, учитывая возможность придонной циркуляции флюидов на глубине до 150 см [Pogodaeva et al., 2020], свидетельствует о восходящем потоке УВ-газа из более глубоких источников.

Концентрация метана в зоне сипа весьма высокая и достигает 370 мл/л (рис. 2, в). В некоторых станциях вскрыты разрезы осадков, содержащие интервалы с газовыми гидратами [Хабуев и др., 2016]. Рост концентрации метана с глубиной характерен для областей дна с активным подтоком глубинного газа [Видищева и др., 2021].

В разрезе станций, вскрывающих осадки транзитной зоны и стенки отрыва оползня, концентрация метана не превышает 70 мл/л, что связано с эрозией отложений и, вероятно, с относительно более активной гидродинамикой придонных вод.

Для оценки устойчивости грунтов в разрезе был проведен аналитический подсчет структурной прочности по 4 точкам. Сравнение структурной прочности с давлением вышележащих осадков [Кучуков, Казеев, 2020; Постоев, 2013] показало, что устойчивость грунтов на глубине 2 м от уровня дна в пределах полигона неоднородна (табл. 2).

Учитывая, что поверхность скольжения оползня расположена на глубине около 30 м от дна (на основании интерпретации данных сейсмоакустического профилирования), где бытовое давление в разы превышает измеренные показатели, следует допустить, что оползневые деформации могут быть образованы практически в любом месте участка Верхнего склона.

Итак, на основании установленных признаков разгрузки газообразных флюидов и анализа аналогичных примеров из других акваторий мы можем предположить две модели формирования оползня Красноярский, в которых основным триггерным механизмом, наряду с сейсмичностью, мог являться газовый флюид и газонасыщение осадков:

1) в сформированном эрозионном склоне происходит подпитка осадков газом как из сипа, так и из глубинного источника. Концентрация растворенного и свободного газа в осадке достигает критической, происходит потеря устойчивости склоновых отложений вблизи эрозионного канала и всей площади оползня, что приводит к развитию предпосылок формирования оползневого тела, вследствие, крупного сейсмического события — землетрясения.

2) равномерно распределенные на глубине 30 м от дна (вдоль поверхности скольжения оползня) скопления газовых гидратов вследствие снижения уровня озера постепенно оказываются в термобарических условиях, не соответствующих сохранности гидратов. Начиная с верхнего участка склона газовые гидраты постепенно диссоциируют на газ и воду, которые попадают в осадки, что снижает устойчивость грунтового массива и приводит к оползанию склона, вследствие, крупного сейсмического события — землетрясения.

Для обоснования первой модели формирования оползня в связи с повышенной газонасыщенностью грунтов мы предполагаем, что возможным путем миграции газа, как с глубинных горизонтов осадочного разреза, так и из диссоциирующих гидратов на нижней границе их стабильности в разрезе осадочной толщи Байкала, мог служить участок осадочной толщи, характеризующийся акустически прозрачным сигналом на профиле, который совпадает с положением нарушения сплошности осей синфазности. Этот участок можно интерпретировать как подводящий разлом (рис. 2, в). Наличие «яркого пятна» — свободного газа под оползнем, газонасыщение осадков метаном в нижней части склона, натурные и расчетные данные по устойчивости грунтов данного района показали предоползневое состояние в настоящее время, что может служить доказательством данной модели.

Для обоснования второй модели формирования оползня в связи с повышенной газонасыщенностью грунтов из-за разложения гидратов мы опираемся на модель, предложенную в работе [McIver, 1982], неоднократно подтвержденную примерами оползней Сторега [Bugge et al., 1988; Micallef et al., 2009; Mienert et al., 2005], оползня на шельфе Мавритании [Li et al., 2016] и др. Кроме того, согласно исследованиям разрезов осадков в районе авандельты р. Селенга [Хлыстов и др., 2008, 2016; Urabe et al., 2004], снижение уровня оз. Байкал на 38–42 м происходило в течение 38000–16000 лет назад, что, по грубой оценке, совпадает с возрастом формирования оползня Красноярский — более 10000–12000 лет, определенным на основании данных о вскрытых разрезах осадков, содержащих диатомово-глинистые илы предположительно голоценового возраста. Мы допускаем, что не вскрытый разрез диатомовых илов в нижней части тела оползня мог быть несколько более мощным, чем максимально задокументированный при пробоотборе, что позволяет предположить о более раннем формировании оползня, в том числе около 16000 лет назад. Однако, в районе оползня на сейсмических профилях не выделяется

современная нижняя граница стабильности газовых гидратов (BSR), вероятные скопления газовых гидратов в нижней части оползня были в зоне их стабильности в период понижения уровня и не могли оказать влияние на формирование канала транзита и, тем самым, вызвать сход оползня. Стенка отрыва изученного оползня, как лишь небольшая часть самого оползневого тела, только отчасти совпадает с верхней границей стабильности газовых гидратов и их разрушение там так же было бы не достаточным для формирования такого крупного оползневого тела. Кроме того, в современных условиях вблизи оползня на глубинах от 600 до 360 м от поверхности озера газовые гидраты в осадках авандельты не обнаружены. Таким образом, второй сценарий является маловероятным, исходя из имеющихся данных.

**Выводы.** Вышеупомянутые особенности Красноярского оползня и характер газонасыщенности осадков в пределах изучаемого полигона позволяют обозначить предпосылки, определяющие развитие гравитационного процесса непосредственно вблизи источника распространения углеводородных газов. В частности, в пределах развития оползня зафиксированы некоторые признаки активной флюидо-разгрузки:

1) сип Красный Яр, расположенный у подножия оползня, для которого подтверждена гидратоносность;

2) аномалии типа яркое пятно, зафиксированные под стенкой отрыва оползня на сейсмических разрезах;

3) неравномерное распределение концентрации растворенных углеводородных газов в грунтах, выраженное в уменьшении значений снизу вверх по оползневому склону;

4) текстуры дегазации в осадках тела оползня.

На основании представленных данных сформулирована гипотеза образования Красноярского оползня, согласно которой ключевым фактором активизации гравитационного процесса служил подток углеводородных газов из осадочной толщи оз. Байкал, а причиной — землетрясение. Вывод о влиянии газов в осадках на возникновение оползня сделан на основе сходства окружающих оползень отложений и локализации оползня вблизи зоны фокусированной флюидо-разгрузки.

**Благодарности.** Авторы статьи выражают благодарность коллективу проекта Class@Baikal, за возможность собрать необходимые данные для исследований, проекту ЛИН СО РАН (№ 0279-2021-0006), в сотрудничестве с которым были осуществлены экспедиции на озеро Байкал, а также экипажу НИС «Г.Ю. Верещагин».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М., Соловьева М.А. и др. Открытие новой гидратоносной структуры на дне оз. Байкал // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2018. № 5. С. 111–116.

Вишнецова О.Н., Ахманов Г.Г., Соловьева М.А. и др. Особенности разгрузки углеводородных газов вдоль разлома Гидратный (озеро Байкал) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2021. № 3. С. 3–16.

- Видищева О.Н., Кислицына Е.В., Ахманов Г.Г. и др. Грязевые вулканы, сипы и газовые гидраты озера Байкал: геохимическая характеристика углеводородных газов // Тр. VI Междунар. науч.-практ. конф. «Морские исследования и образование (MARESEDU-2017)». Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2017. С. 211–215.
- Гольмиток А.Я., Дучков А.Д., Хатчинсон Д.Р. и др. Оценки теплового потока на озере Байкал по сейсмическим данным о нижней границе слоя газовых гидратов // Геология и геофизика. 1997. № 10. С. 1677–1691.
- Дучков А.Д. Газогидраты метана в осадках озера Байкал // Российский химический журнал. 2003. Т. 47, № 3. С. 91–100.
- Кудаев А.А., Корост Д.В., Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М. Аутигенная минерализация в зонах фокусированной разгрузки углеводородов озера Байкал // Комплексные исследования Мирового океана: Мат-лы II Всеросс. науч. конф. молодых ученых, Москва, 2017, 10–14 апреля 2017 г. [Электрон. ресурс]. М.: ИО РАН, 2017А. С. 478–479.
- Кудаев А.А., Карпенко Ф.С., Корост Д.В. и др. Оценка влияния газонасыщенности поровых вод на физические свойства связных дисперсных (глинистых) грунтов методом смешивания с цеолитами // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2022. № 5. С. 73–86.
- Кузьмин М.И., Кузьмин М.И. Байкальский буровой проект: краткая история, основные результаты // Смирновский сборник. 2000. С. 96–118.
- Кучуков М.М., Казеев А.И. Геологические факторы при формировании и развитии оползневых смещений на участке мостового перехода через р. Сура // Сергеевские чтения: Геоэкологические аспекты реализации национального проекта «Экология». Диалог поколений. 2020. С. 232–238.
- Уломов В.И. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии / Отв. ред. В.И. Уломов. Т. 1. М.: ИФЗ РАН, 1993. 303 с. и Т. 2–3. М.: ОИФЗ РАН, 1995. 490 с.
- Постоев Г.П. Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований). СПб.: Нестор-История, 2013.
- Соловьева М.А., Старовойтов А.В., Ахманов Г.Г. История оползневой деструкции склона Кукуйской гривы (оз. Байкал) по данным сейсмоакустических исследований // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2016. № 5. С. 47–59.
- Сорокичкова Л.М., Поповская Г.И., Томберг И.В. Башенхаева Н.В. Пространственно-временная изменчивость содержания биогенных и органических веществ и фитопланктона в воде р. Селенги и протока ее дельты // Водные ресурсы. 2009. № 4. С. 465–474.
- Хабуев А.В., Ченский Д.А., Соловьева М.А. и др. Оценка ресурсов газовых гидратов геофизическими методами в зоне подводной разгрузки газа на сипе «Красный Яр» озера Байкал // Науки о Земле и недропользование. 2016. № 1 (54). С. 67–74.
- Хлыстов О.М., Ханаев И.В., Грачев М.А. Свидетельства низкого стояния уровня озера Байкал во время последнего оледенения // Докл. РАН. 2008. Т. 422, № 2. С. 254–257.
- Хлыстов О.М., Кононов Е.Е., Хабуев А.В. Газогидратные скопления в донных осадках озера Байкал // Науки о Земле и недропользование. 2011. Т. 39, № 2. 247–252.
- Хлыстов О.М., Кононов Е.Е., Хабуев А.В. и др. Геолого-геоморфологические особенности Посольской банки и Кукуйской гривы озера Байкал // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 12. С. 2229–2239.
- Aloisi G., Pogodaeva T.V., Poort J. et al. Biogeochemical processes at the Krasny Yar seepage area (Lake Baikal) and a comparison with oceanic seeps // Geo-Marine Lett. 2019. Vol. 39, No. 1. P. 59–75.
- Bezrukova Y.V., Bogdanov Y.A., Williams D.F. et al. A dramatic change of the ecological-system of lake Baikal in holocene // Doklady Akademii Nauk SSSR. 1991. Vol. 321, No. 5. P. 1032–1037.
- Bugge T., Belderson R.H., Kenyon N.H. The storegga slide // Philosoph. Transactions of the Royal Soc. of London. Ser. A, Mathematical and Physical Sciences. 1988. Vol. 325, No. 1586. P. 357–388.
- Colman S.M., Jones G.A., Rubin M. et al. AMS radiocarbon analyses from Lake Baikal, Siberia: Challenges of dating sediments from a large, oligotrophic lake // Quaternary Sci. Rev. 1996. Vol. 15, No. 7. P. 669–684.
- Cuylaerts M., Naudts L., Casier R. et al. Distribution and morphology of mud volcanoes and other fluid flow-related lake-bed structures in Lake Baikal, Russia // Geo-Marine Letters. 2012. Vol. 32, No. 5–6. P. 383–394.
- Granin N.G., Makarov M.M., Kucher K.M., Gnatovsky R.Y. Gas seeps in Lake Baikal — detection, distribution, and implications for water column mixing // Geo-Marine Letters. 2010. Vol. 30, No. 3–4. P. 399–409.
- Kaminski P., Urlaub M., Grabe J., Berndt C. Geomechanical behaviour of gassy soils and implications for submarine slope stability: a literature analysis // Geological Soc. London, Special Publications. 2020. Vol. 500, No. 1. P. 277–288.
- Khlystov O., De Batist M., Shoji H. et al. Gas hydrate of Lake Baikal: Discovery and varieties // J. Asian Earth Sci. 2013. Vol. 62. P. 162–166.
- Kononov E.E., Khlystov O.M., Kazakov A.V. et al. The lake floor morphology of the Southern Baikal rift basin as a result of Holocene and Late Pleistocene seismogenic and gravitational processes // Quaternary International. 2019. Vol. 524. P. 115–121.
- Li A., Davies R.J., Yang J. Gas trapped below hydrate as a primer for submarine slope failures // Marine Geology. 2016. Vol. 380. P. 264–271.
- McIver R.D. Role of naturally occurring gas hydrates in sediment transport // AAPG bull. 1982. Vol. 66, No. 6. P. 789–792.
- Micallef A., Masson D.G., Berndt C., Stow D.A. Development and mass movement processes of the north-eastern Storegga Slide // Quaternary Science Reviews. 2009. Vol. 28, No. 5–6. P. 433–448.
- Mienert J., Guidard S., Bünz S., Vanneste M., Berndt C. Ocean bottom seismometer investigations in the Ormen Lange area offshore mid-Norway provide evidence for shallow gas layers in subsurface sediments // Ormen Lange an Integrated Study for Safe Field Development in the Storegga Submarine Area. Elsevier, 2005. P. 287–297.
- Pogodaeva T.V., Poort J., Aloisi G. et al. Fluid migrations at the Krasny Yar methane seep of Lake Baikal according to geochemical data // J. Great Lakes Res. 2020. Vol. 46, No. 1. P. 123–131.
- Prior D.B., Coleman J.M. Disintegrating retrogressive landslides on very-low-angle subaqueous slopes, Mississippi delta // Marine Georesources & Geotechnology. 1978. Vol. 3, No. 1. P. 37–60.
- Urabe A., Tateishi M., Inouchi Y. et al. Lake-level changes during the past 100,000 years at Lake Baikal, southern Siberia // Quaternary Res. 2004. Vol. 62, No. 2. P. 214–222.

*Wheeler S.J.* The stress-strain behaviour of soils containing gas bubbles. University of Oxford, 1986.

*Wheeler S.J.* The undrained shear strength of soils containing large gas bubbles // *Géotechnique*. 1988. Vol. 38, No. 3. P. 399–413.

*Wheeler S.J.* A conceptual model for soils containing large gas bubbles // *Geotechnique*. 1988. Vol. 38, No. 3. P. 389–397.

*Whelan T., Coleman J.M., Roberts H.H., Suhayda J.N.* The occurrence of methane in recent deltaic sediments and its effect on soil stability // *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*. 1976. Vol. 13, No. 1. p. 55–64.

*Zhang M., Niu M., Shen S. et al.* Review of natural gas hydrate dissociation effects on seabed stability // *Natural Hazards*. 2021. Vol. 107, No. 2. P. 1035–1045.

<http://class-baikal.ru> (официальный сайт проекта Class@Baikal).

<http://lin.irk.ru/multibeam/ru/results> (Bathymetry data of LIN SB RAS and RCMG after RAS 17.8 Program (2009) and FWO Flanders (1.5.198.09) Project. 2009).

<http://www.seis-bykl.ru/index.php> (сейсмичность на Байкале)

Статья поступила в редакцию 15.05.2022,  
одобрена после рецензирования 22.03.2023,  
принята к публикации 22.05.2023