
**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ
И ПРИКЛАДНАЯ ГЕОМОРФОЛОГИЯ**

УДК 551.435.62+551.466.62 (571.61+571.62)

**КРУПНЫЙ ОПОЛЗЕНЬ И ВЫЗВАННОЕ ИМ ЦУНАМИ
В БУРЕЙСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ**© 2020 г. А. Н. Махинов^{1,*}¹ *Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск, Россия***E-mail: amakhinov@mail.ru*

Поступила в редакцию 29.08.2019 г.

После доработки 19.11.2019 г.

Принята к публикации 10.03.2020 г.

Установлены строение, параметры, причины и последствия крупного оползня объемом 24.5 млн. м³ на крутом склоне Бурейского водохранилища в его узкой горной части (Хабаровский край). Смещение горных масс произошло 11 декабря 2018 г. при температуре воздуха ниже –30°C. Выявлено, что причиной оползня явилось сочетание ряда факторов, таких как большая крутизна склона, наличие сильно трещиноватых пород в зоне тектонического дробления, таяние многолетнемерзлых пород и обводнение грунтов в нижней части склона. В результате смещения оползня образовалась плотина протяженностью 800 м и высотой до 47 м над уровнем воды, разделившая водохранилище на две изолированные части. Выявлена неоднородность состава отложений оползневого тела, значительную часть которого составляют многолетнемерзлые породы.

Оползень вызвал волну цунами, которая распространилась по водохранилищу на 11 км в обе стороны по долине реки Бурея и вверх на 3.2 км по долине реки Ср. Сандар, расположенной напротив оползня. Максимальная высота заплеска волны достигала 90 м в узкой части долины в среднем течении реки Ср. Сандар. Волной был полностью уничтожен лес на площади 300 га, а также разрушены и смыты склоновые отложения на площади около 100 га. На склонах образовались многочисленные борозды размыва протяженностью до 20 м и глубиной до 1.2 м. В настоящее время на стенке срыва активизировались обвалы и небольшие оползни.

Роль антропогенного фактора в формировании оползня заключается в отепляющем воздействии воды на мерзлые породы в основании крутого склона долины в результате подъема уровней воды при заполнении водохранилища Бурейской ГЭС.

Ключевые слова: Бурейское водохранилище, оползень, стенка срыва, оползневое тело, морфология, современные процессы

DOI: 10.31857/S0435428120030086**ВВЕДЕНИЕ**

Оползни — опасное природное явление, достаточно часто происходящее в различных регионах мира. Однако случаи их смещения в крупные водоемы с формированием цунами редки. Общеизвестна подобная ситуация, случившаяся в октябре 1963 г. в водохранилище ущелья Вайонт в Италии, приведшая к многочисленным жертвам. В декабре 2007 г. большой оползень сошел на берегу озера Чехалис в Канаде [1], а в сентябре 2018 г. произошла серия смещений значительных по объему грунтовых масс на берегах залива Палу в Индонезии [2]. В последние годы крупные оползни активизировались на берегах водохранилища Три ущелья (Санся) в Китае. На Дальнем Востоке оползневые явления распространены довольно широко [3]. Наиболее крупные из них в последние годы произошли в долинах рек Зеи в 1985 г. [4] и Гейзерной в 2007 г. [5]

объемом 6 и 20 млн м³ соответственно. Подобные достаточно редкие события вызывают большой интерес среди специалистов, поскольку каждое из них обладает своими особенностями, исследования которых способствуют выявлению разнообразия факторов, механизмов и последствий, а также совершенствованию прогнозов этих опасных природных явлений.

Подобный крупный оползень 11 декабря 2018 г. сошел в Хабаровском крае в водохранилище Бурейской ГЭС. Он сформировался на крутом левом борту долины р. Буреи напротив устья р. Ср. Сандар в 20 км выше впадения р. Тырма [6, 7]. Координаты центральной части стенки срыва — 50°33'13" с. ш. и 131°28'22" в. д. Произошел он, как было установлено по отразившей это событие сейсмограмме, в 14 ч 48 мин по местному времени.

Тело оползня сформировало высокую каменную плотину, перегородившую Бурейское водохранилище в его наиболее узком месте и разделившую его на две изолированные части. Образованное в результате смещения пород цунами прошло вверх и вниз по водоему, а также по долине р. Ср. Сардар, в общей сложности оказав воздействие на берега протяженностью около 20 км. Лед толщиной 20 см на водохранилище был взломан и распределен в виде мелких фрагментов размером до 0.5 м по всей площади прохождения волны.

Сразу после сообщения местных жителей о природном катаклизме Институтом водных и экологических проблем ДВО РАН были организованы и проведены экспедиционные исследования с целью выявить особенности и оценить последствия редкого для России оползня. Основные результаты работ приведены в данной статье.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Первое аэровизуальное и кратковременное наземное обследование участка долины Буреи в районе события были проведены 25 декабря 2018 г. Детальные экспедиционные исследования непосредственно на оползне и в его окрестностях проводились 12–17 января и 17–21 июня 2019 г.

Во время зимних работ были получены первые данные об основных морфологических и морфометрических характеристиках стенки срыва и оползневого тела, а также предварительно оценены последствия смещения оползня.

Подробную высотную и плановую съемку поверхности стенки срыва и оползневого тела в масштабе 1:500 провели в середине января сотрудники ООО “Инженерные изыскания ДВ”. Использовался приемник сигналов двухчастотной аппаратуры GPS/ГЛОНАСС геодезического класса, что позволило зафиксировать точные размеры и пространственные параметры оползня (табл. 1). Описание морфологических особенностей оползня выполнено по данным этой съемки.

Отметки высот заплесков цунами определялись инструментально и визуально. Несмотря на неблагоприятные погодные условия (температура воздуха — 35–40°C, глубина снежного покрова на склонах до 70 см), проводились маршруты по периметру стенки срыва, в долинах рек Ср. Сандар и Буреи в окрестностях оползня с проведением фотофиксации. Для оценки размеров подводной части оползня было выполнено более 50 измерений глубин лотом со льда.

Летом была проведена детальная батиметрическая съемка дна с использованием эхолота, позволившая определить точные параметры подводной части оползневого тела. С целью определения распространения цунами проводились маршруты по линии заплеска волны по долинам рек Бурея, Ср. Сандар и заливов водохранилища. Высотные отметки измерялись портативным GPS приемником Garmin с постоянной привязкой к урезу воды в водохранилище. Одновременно оценивался характер ударного воздействия волны на земную поверхность. Измерялись размеры и глубина эрозионных борозд на склонах, образованных прямым и обратным потоками воды. Визу-

Таблица 1. Основные параметры Бурейского оползня

Размеры стенки срыва на склоне	600 × 450 м
Длина оползневого тела	800 м
Ширина надводной части оползневого тела максимальная/минимальная	620/150 м
Площадь надводной части оползневого тела	270 000 м ²
Объем оползневого тела	24.5 млн м ³
Объем подводной части оползневого тела	20.0 млн м ³
Высота над водой максимальная/минимальная	47 м/8.5 м
Глубина водохранилища	65–70 м
Максимальная высота заплеска цунами	90 м
Площадь снятого ударной волной слоя склоновых отложений	≥100 га
Глубина эрозионных борозд на склонах	0.7–1.2 м
Площадь уничтоженного леса	300 га

ально выявлялись морфологические особенности поверхности в разных частях оползневого тела, и оценивалась интенсивность современных экзогенных процессов на этом участке долины.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

На территории бассейна среднего течения р. Буреи распространены преимущественно интрузивные и метаморфические породы различного возраста – от раннепротерозойского до позднепалеозойского [8]. В коренном залегании на крутых склонах они местами выходят на дневную поверхность в виде скалистых выступов и отдельных невысоких останцов. Левый крутой склон долины Буреи (южный берег водохранилища) сложен раннепротерозойскими породами, представленными прочными кристаллическими сланцами, амфиболитами с линзами доломитов, мраморов и гнейсов. Встречаются маломощные прослои метаморфизованных песчаников.

Позднепалеозойские интрузии прорывают породы раннепротерозойского возраста и состоят из порфировидных розовато-серых биотитовых и биотит-роговообманковых гранитов, плагиогранитов и гранодиоритов. Все они характеризуются массивным сложением и высокой прочностью. Внедрение интрузий происходило по разломам, о чем свидетельствует наличие местами катаклазированных и гнейсовых текстур.

Обширные интрузивные массивы пронизаны многочисленными малыми жильными телами преимущественно кислого и основного составов. Жилы крутопадающие, их мощность от 0.5–1.0 м до 3–5 м. По составу они весьма разнообразны и относятся к аплитам, фельзит-порфирам, кварцевым порфирам, гранит-порфирам, сиенит-порфирам. Среди жил основного состава встречаются габбро-диабазы, диабазовые порфириты, диоритовые и кварцевые диоритовые порфириты.

В составе отложений оползневого тела имеются блоки пород зон интенсивного тектонического дробления, состоящие из песчано-глинистого материала светло-желтого цвета с включениями дресвы и мелкого щебня сильно измененных пород. Они представляют собой продукт измельчения массивных пород при неоднократных проявлениях тектонической активности в зоне разлома.

Рассматриваемая территория расположена в пределах многократно активизированной части Бурейского срединного массива. В истории ее геологического развития большая роль в тектонической активности принадлежала интрузивной деятельности, проявлявшейся в палеозойское время и в начале мезозоя. Территория пересечена многочисленными разломами СВ и СЗ простираний. Одна из наиболее значительных

тектонически активных зон СВ простираения проходит вдоль долины р. Бурей и выходит на ее левый борт (южный берег водохранилища) напротив устья р. Ср. Сандар. Именно в этом месте и произошел оползень. В настоящее время район среднего течения р. Бурей характеризуется слабой сейсмической активностью.

РЕЛЬЕФ

Река Бурей — один из крупнейших притоков Амура. Ее долина имеет общее направление с СВ на ЮЗ. В своем среднем течении, на участке от впадения р. Ушмун до устья р. Мальмалта она расположена между отрогами хребтов Турана на северо-западе и Бурейского на юго-востоке. Эрозионно-денудационный рельеф территории характеризуется в целом плавными очертаниями приводораздельных пространств. Высотные отметки гор с приближением к Бурее постепенно снижаются с 1100–1300 м до 700–800 м над у. м. Лишь наиболее крупные реки имеют здесь глубоко врезаемые долины. Днище долины Бурей расположено на высотах 220–150 м и отличается большим уклоном продольного профиля. Большие относительные превышения обуславливают значительную вертикальную расчлененность рельефа и широкое распространение крутых склонов, особенно в долине Бурей и в долинах нижних течений ее притоков.

Рисунок речной сети этой территории решетчатый; сама долина Бурей неоднократно поворачивает под прямым углом, что вероятно указывает на ее заложение по тектонически ослабленным зонам. Многие притоки, расположенные на противоположных берегах реки, нередко имеют единое направление долин, что также свидетельствует об их заложении по линиям разломов. В нижних течениях они активно врезаются и формируют глубокие ущелья с крутыми склонами.

Долина Бурей на рассматриваемом участке имеет широтное направление (рис. 1). Она глубоко врезана — при ширине по верхней бровке 1.3–1.5 км относительные превышения расположенных рядом вершин над днищем 550–600 м. На всем протяжении исследуемого участка она затоплена водами Бурейского водохранилища, ширина затопленной части достигает 500–550 м при глубине 60–80 м. Устьевые участки притоков также затоплены и образуют узкие и глубокие заливы. Колебания уровня воды в водохранилище между максимальными отметками в начале осени и минимальными весной составляет 20 м.

Поперечный профиль долины-водохранилища асимметричный — левый (южный) борт высотой около 500 м с уклонами 30–35°. На нем залегает маломощный слой грубообломочного материала, перекрытого тонким горизонтом почвы. До наполнения водохранилища русло реки на этом участке смещалось влево (к югу) и подрезало основание склона, постоянно увеличивая его крутизну. Такие крутые (в прошлом — подмываемые рекой) участки сейчас располагаются попеременно то на северном, то на южном берегах водохранилища.

На правом (северном) борту долины находится пологонаклонная террасовидная поверхность эрозионного происхождения с отметками 45–60 м над современным уровнем воды в водохранилище, за который принята абсолютная отметка уреза в середине января — 258.0 м, близкая к НПУ. Наибольшей ширины (до 1.1 км) она достигает на междуречье нижнего течения р. Ср. Сандар и расположенной к востоку от него долины небольшого водотока. Рыхлые отложения в ее пределах представлены продуктами выветривания гранодиоритов, под которыми залегают трещиноватые коренные породы. Общая мощность выветрелой толщи составляет 1.0–1.2 м, ее верхняя часть (0.6–0.7 м) представлена щебнисто-суглинистым материалом. Аллювиальные отложения в пределах террасовидной поверхности не обнаружены.

Рассматриваемая территория расположена в зоне прерывистой многолетней мерзлоты [9]. Многолетнемерзлые породы выявлены на значительной части северного

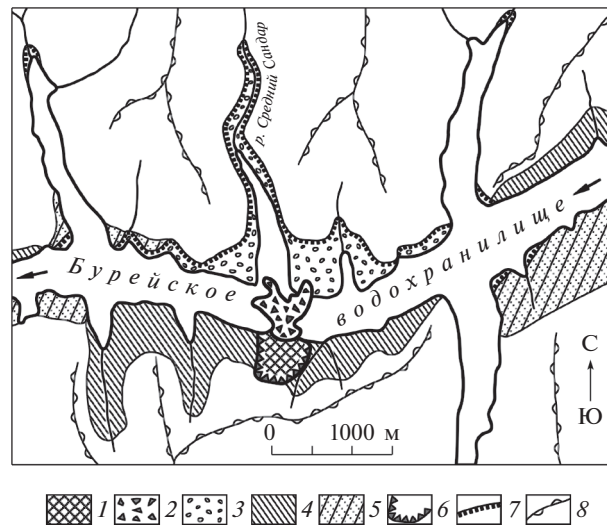


Рис. 1. Положение оползня в долине р. Буреи и границы воздействия цунами.

1 – поверхность скольжения оползня; 2 – оползневое тело; 3 – ареал уничтоженного волной леса; *склоны долины*: 4 – крутые, 5 – пологие; 6 – бровка стенки срыва; 7 – граница заплеска цунами; 8 – линии водоразделов. Стрелкой показано направление течения.

склона долины Буреи. В мерзлом состоянии во время катастрофического события находились и крупные (размером в несколько метров) блоки тонкодисперсных отложений зоны дробления, перенесенные с левого склона долины на правый.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПОЛЗНЯ

Стенка срыва. До формирования оползня левый (южный) борт долины Буреи имел выпуклую форму. Крутизна его в нижней части составляла до 40° . Стенка срыва в плане имеет почти прямоугольную форму и значительные размеры: в длину – 600 м, в ширину – около 450 м (рис. 2). Максимальная толщина сместившегося блока пород достигала 150 м. С трех сторон по периметру стенки срыва вдоль верхней и боковых бровок образовались очень крутые, местами почти отвесные уступы высотой до 30 м, сложенные скальными породами. Расположенная под ними более пологая поверхность смещения перекрыта маломощным чехлом осыпного материала, состоящим из скальных обломков разного размера и небольших фрагментов рыхлых пород со стволами деревьев, сместившихся сверху. Продольный профиль стенки срыва имеет вогнутую форму с наименьшим уклоном (не превышающим 25°) в нижней ее части.

Северная и северо-западная бровки стенки срыва в зоне распространения рыхлых пород осложнены извилистыми в плане зияющими трещинами шириной до нескольких метров. По некоторым из них сразу после схода основной массы оползня сместились отдельные блоки пород на 3–4 м вниз.

Оползневое тело перекрыло водохранилище до противоположного берега, его протяженность поперек затопленного русла достигала 800 м. Надводная часть оползня имела вид лопасти, расширяющейся в сторону правого берега. Ширина плотины в надводной части неодинакова – в самом узком месте она равна 150 м при максимальной величине в средней части 620 м. Общая площадь оползневого тела составляла более 270000 м^2 (рис. 3). При этом с западной стороны оползня вблизи южного берега имелись следы довольно широкого выброса обломочного материала, что, вероятно,



Рис. 2. Стенка срыва оползня 17.06.2019 г. (здесь и далее фото А.Н. Махинова).

может свидетельствовать о нескольких направлениях смещения масс при заполнении наиболее глубокой части водохранилища.

Поверхность надводной части оползневого тела неоднородна. По особенностям рельефа в ее пределах выделяются три участка. Наиболее высокая часть с резко выраженными мезоформами рельефа находится вблизи правого (северного) борта долины водохранилища. Здесь сформировались высокие параллельные гряды с конусообразными вершинами, разделенные довольно глубокими линейными понижениями. Их образование было обусловлено сильным давлением смещающихся масс на уступ террасовидной поверхности. Над этим уступом и несколько далее него произошло выдавливание преимущественно крупных блоков пород и глыб вверх с образованием нескольких коротких гряд с крутыми склонами. В этой части высота наиболее крупной гряды достигала максимальных отметок 47 м над уровнем воды в водохранилище (рис. 4).

Наличие нескольких коротких и высоких валообразных нагромождений раздробленных пород во фронтальной части оползневого тела также свидетельствует о мощном боковом давлении оползня при его движении в сторону северного склона долины Буреи. Валы сложены разнообразным по размеру обломочным материалом, в составе которого преобладают глыбы размером до нескольких метров в поперечнике (рис. 5). При первичном обследовании нередко встречались блоки сцементированных многолетней мерзлотой рыхлых пород, состоящие из скоплений глыб, щебня и суглинисто-песка.

Западная часть оползневого тела, частично продолжающаяся в долину р. Ср. Сандар, расположена в наиболее глубокой части водохранилища. В ее пределах хаотично расположены изометричные возвышения (до 3 м) и плавные вытянутые в разных направлениях ложбины, общий перепад высот не превышает 10–15 м. Отложения представлены рыхло сложенными скоплениями крупных глыб.

В тыловой части оползневого тела наблюдаются участки “пьяного леса” с очень небольшими фрагментами ненарушенного почвенного покрова. Вероятно, эта часть оползня возникла на последнем этапе смещения отложений самой верхней части оползневого склона. Здесь вблизи южного берега водохранилища образовалось подобие седловины с наиболее низкими высотами на поверхности оползневого тела. Минимальная отметка ее над урезом воды во время зимнего обследования составляла 8,5 м, а протяженность — около 150 м.

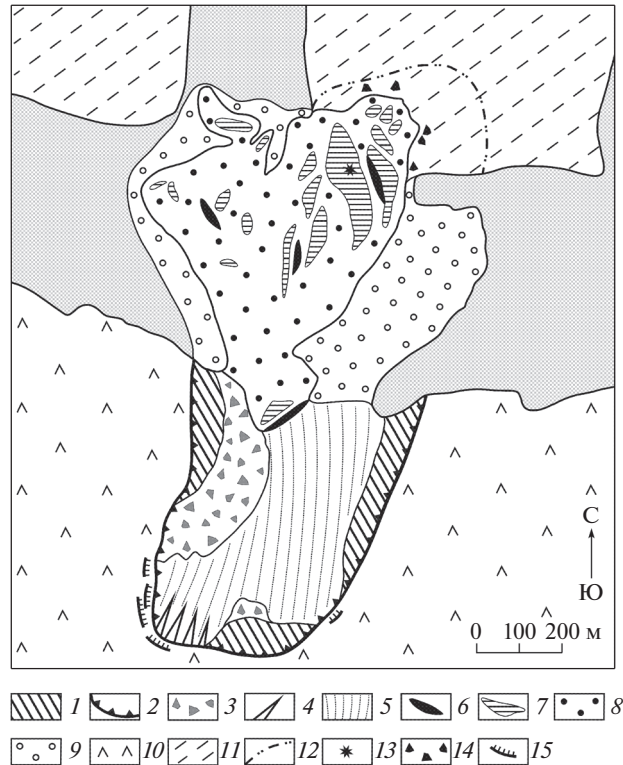


Рис. 3. Схема оползня по данным наземной съемки в середине января 2019 г.

1 – крутые стенки отрыва оползня с выходами коренных пород; 2 – бровка стенки срыва; 3 – скопления обломков у подножия уступа; 4 – рытвины; 5 – пологая стенка срыва с маломощным чехлом рыхлых отложений; 6 – глубокие рвы; 7 – гряды; 8 – поверхность оползневого тела; 9 – подводная часть оползня; 10 – крутой склон; 11 – террасовидная поверхность; 12 – площадь распространения галечного материала из затопленного русла Буреи; 13 – максимальная высотная отметка тела оползня; 14 – отдельно расположенные крупные камни; 15 – рвы и трещины отседания.

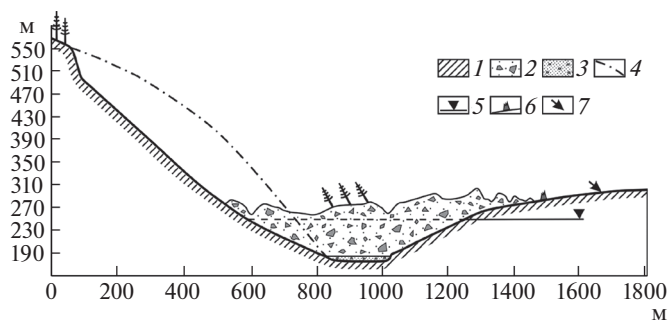


Рис. 4. Профиль через долину-водохранилище р. Буреи.

1 – коренные породы; 2 – оползневое тело; 3 – аллювиальные отложения; 4 – первоначальное положение левого склона долины; 5 – уровень воды во время смещения оползня; 6 – отдельные крупные глыбы; 7 – граница распространения галечного материала, принесенного волной на противоположный склон долины.



Рис. 5. Гряды на фронтальной части оползневого тела.

Между этой седловиной и основанием поверхности скольжения образовалась изометричная в плане гряда высотой 22.9 м над уровнем воды в водохранилище. Она имеет пологий уклон к северу и крутой к основанию склона, вдоль которого проходит еще один ров с максимальной глубиной и крутыми склонами в восточной части; западнее этот ров выклинивается; высота гряды над урезом воды 20.7 м. На ее вершине в середине января 2019 г. был обнаружен обломок льда размером около 60 см в поперечнике, принесенный обратной волной из долины р. Ср. Сандар.

За пределами конечных гряд на террасовидной поверхности правого (северного) борта долины Буреи на расстоянии до 10–12 м от них расположены отдельно лежащие глыбы размером до $3 \times 3 \times 4$ м и менее крупные скопления разноразмерного обломочного материала. Зимой здесь повсюду встречались небольшие обломки льда толщиной около 20 см, принесенные волной из водохранилища.

Еще дальше — на расстоянии до 200 м от края оползневого тела — на поверхности склона (в том числе, на сохранившихся фрагментах почвенного покрова) обнаружена идеально окатанная галька (IV класса по шкале А.В. Хабакова) размером до 10 см. Она встречается до высоты 45 м над урезом водохранилища. Местами отмечены ее небольшие скопления, вытянутые по направлению движения волны вверх по склону. Чем дальше от границы оползневого тела, тем меньше размеры и количество галечного материала. Эта галька, несомненно, была захвачена со дна водохранилища, — из затопленного русла р. Буреи, и принесена волной на поверхность склона. С учетом глубины затопленного русла галечный материал был поднят на высоту более 100 м.

В июне 2019 г. вблизи фронтальной части оползневого тела на северном борту долины Буреи было обнаружено несколько правильных по форме конусов высотой до 3 м, сложенных суглинисто-щебнистым материалом. Анализ их положения на фотоснимках, сделанных в январе, показал, что зимой они представляли собой неправильной формы глыбы рыхлых пород, находящихся в мерзлом состоянии. При оттаивании весной и в начале лета они потеряли первоначальную форму и в результате осыпания обломочного материала приобрели конический вид.

Подводная часть оползня расположена асимметрично относительно его надводной части. Основная масса смещенного грунта под водой сосредоточена с восточной стороны и залегает на глубине 20–40 м в виде расширяющейся к северному борту террасы с максимальной шириной до 250 м. Ее рельеф, в целом более выровненный по сравне-



Рис. 6. Уничтоженный цунами лес на правом (северном) пологом склоне долины р. Буреи.

нию с надводной частью, характеризуется плавными повышениями и понижениями. Вдоль западной стороны поверхность оползня крутым склоном уходит под урез воды.

Общий объем оползня, рассчитанный с учетом параметров образованного углубления в склоне и размеров оползневого тела, составляет 24.5 млн м³, или около 55 млн т.

ВОЛНА ЦУНАМИ И ЕЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

Смещение значительного объема пород в достаточно глубокий водоем вызвало формирование водно-ледяной волны, представляющей собой большое цунами. Для российской территории возникновение такого масштабного природного явления, порожденного крупным оползнем в водохранилище, — событие уникальное. Волна обрушилась на противоположный пологий склон долины, заросший довольно густым лиственнично-березовым лесом. Она продвинулась вверх по склону почти на 700 м, достигнув высоты около 60 м над урезом воды в водохранилище. Водный поток при своем движении на всем пути ломал стволы деревьев, оставляя пни высотой менее 0.5 м (рис. 6). Вдоль границы леса, не затронутого потоком, образовались скопления принесенных водой деревьев в виде высокого вала. Значительная часть деревьев обратным потоком воды была снесена в водохранилище, где они вмерзли в лед.

Волна, постепенно снижаясь, прошла по долине-водохранилищу вверх на 11 км и вниз на 10 км. Она также ломала и переносила деревья вверх по склону, и часть их была также смыта в водохранилище. При этом за выступами рельефа (“в тени”) высота подъема волны заметно снижалась.

Напротив сошедшего оползня расположена долина р. Ср. Сандар, нижний отрезок которой в настоящее время представляет собой крутосклонный залив водохранилища. Своим устьем она открыта к склону, на котором произошло оползание. Возникшая волна прошла вверх по долине на 3.2 км, достигнув отметок 70 м над урезом водохранилища. Следуя поворотам долины, волна вначале направилась к левому ее борту, а затем перешла на правый, изменяя высоту в зависимости от крутизны склонов и угла подхода к берегу. Максимальной высотной отметки 90 м волна достигла на правом борту долины р. Ср. Сандар на расстоянии 2.3 км от устья. Долина реки на этом участке становится узкой и делает резкий поворот к востоку.

Затем волна по долине р. Ср. Сандар вернулась в водохранилище, достигнув его южного берега. Она также размывла почвенный покров и сдвинула крупные глыбы на крутом склоне в средней части долины, о чем свидетельствует напользование обломков пород на пни сломанных деревьев. Некоторые из таких глыб имеют массу до 30 т.

Общая площадь, на которой был полностью уничтожен лес, составила около 3.0 км². Гидродинамический удар волны на обращенные к ее фронту склоны разрушил почвенный покров на участках протяженностью в сотни метров вдоль берегов водохранилища. Особенно большую площадь лишенные рыхлых отложений склоны занимают на уступе террасовидной поверхности, где скорость течения обратного потока воды была наиболее значительной. Выше уступа прослеживаются хорошо выраженные размывы грунта в виде линейно вытянутых ложбин. Протяженность их достигает 20 м при ширине до 5 м и глубине 0.7–1.5 м. Большие по площади участки размыва чехла склоновых отложений отмечены в нижнем течении долины р. Ср. Сандар, где волна имела наибольшую высоту и энергию.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОПОЛЗНЯ

В настоящее время стенка срыва и оползневое тело испытывают преобразование вследствие деятельности различных экзогенных процессов. Основную роль в этом играют обвалы на скалистых участках стенки и сползание небольших блоков рыхлых пород в зоне наиболее интенсивного дробления, а также эрозионные процессы, разрушившие низкую переемычку между южным бортом долины-водохранилища и оползневой телом. Вдоль верхней и западной кромок стенки срыва имеются многочисленные трещины, по которым время от времени происходят небольшие оползни размером до 5 × 20 м. В июне на западной кромке отвесной стенки срыва, сложенной скальными породами, постоянно происходили камнепады (рис. 7). Активизация этих процессов обусловлена, вероятно, оттаиванием многолетней мерзлоты.

Несмотря на то что оползень произошел в безлюдной местности, его негативные последствия могли существенно повлиять на хозяйственную деятельность. Возникла угроза, что в зимний период приток воды в основную часть водохранилища уменьшится, что вызовет сокращение выработки электроэнергии на Бурейской ГЭС. Кроме того, во время весеннего половодья при снежной зиме и быстром таянии снега и, особенно во время высоких летних паводков, был бы возможен значительный подъем воды в верхней части водохранилища (выше каменной плотины), что угрожало бы подтоплением пос. Чекунда и прилегающим к нему территориям, в том числе в зоне БАМ.

Поэтому было принято решение восстановить сток между обеими частями водохранилища на максимально низком уровне. В январе-феврале 2019 г. специалисты Министерства обороны России оперативно организовали и успешно провели взрывные работы по частичному разрушению возникшей в результате оползня плотины и восстановлению свободного перетока воды из верхней части водохранилища в нижнюю его часть. Это было вызвано необходимостью обеспечить нормальную работу Бурейской ГЭС и не допустить затопление населенных пунктов на берегах верхней части водохранилища во время летних паводков. В итоге был создан глубокий канал (искусственное русло), по которому вода стала свободно проходить через плотину.

В начале мая 2019 г. при подъеме уровня воды в верхней части водохранилища произошел прорыв тела дамбы, в результате которого рукотворное русло существенно расширилось и углубилось. Уровни воды выше и ниже оползневой дамбы выровнялись, что снизило остроту проблем, связанных с эксплуатацией водохранилища. По данным специалистов Дальневосточного УГМС на конец июня 2019 г. ширина восстановленного русла составила 140 м, средняя глубина 21.7 м, средняя скорость течения 0.38 м/с, расход воды 1150 м³/с. Вместе с тем актуальными остаются вопросы оценки



Рис. 7. Камнепад на западной стенке срыва Бурейского оползня (20 июня 2019 г.).

экологических последствий оползня, в т.ч. смыва со склонов в акваторию водохранилища значительного объема древесины и почв [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных материалов показал, что причиной схода оползня явилось сочетание ряда факторов, прежде всего: 1) большая крутизна склона, 2) наличие сильно трещиноватых пород в зоне тектонического дробления и 3) обводнение грунтов в нижней части склона в результате подъема уровня воды на 70 м при заполнении водохранилища Бурейской ГЭС. Не исключено, что большую роль в подготовке смещения огромного блока горных пород могло также сыграть таяние многолетнемерзлых пород в основании склона в результате отепляющего влияния вод водохранилища. Следов более древних масштабных оползней на этом горном участке долины Буреи к настоящему моменту не выявлено, хотя не исключено, что они могут быть обнаружены при более детальном обследовании территории.

Таким образом, оползень в долине р. Буреи представляет собой уникальное для низкогорных районов природное явление, прежде всего, вследствие его значительных размеров и образования цунами. Весьма необычным является также зимнее время формирования оползня, что в целом не характерно для территории дальневосточного региона. Возможно, оползанию способствовало и снижение уровня водохранилища в начале зимы при его сработке.

Риск возникновения крупных оползней и вызванных ими разрушительных волн должен приниматься во внимание при эксплуатации крупных водохранилищ Сибири и Дальнего Востока. В связи с этим необходимо проведение работ по выявлению участков склонов, представляющих потенциальную опасность для образования подобных явлений. На наиболее опасных склонах следует организовать инструментальный мониторинг за ситуацией путем установки высокочастотных сейсмоприемников, которые могут регистрировать трещинообразование. По изменению уровня микросейсмической активности можно судить о повышении вероятности срыва оползня с заблаговременностью до нескольких дней.

В дальневосточном регионе опасные природные процессы наносят ущерб населению и хозяйственной деятельности, но пока еще они не достигают значительных раз-

меров только вследствие слабой в целом освоенности и заселенности территории. Однако по мере все более интенсивного экономического развития региона негативные последствия оползней, снежных лавин, селевых потоков и других неконтролируемых человеком природных явлений будут все более внушительными, что необходимо учитывать при планировании различных хозяйственных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Omira R., Dogan G.G., Hidayat R., Husrin G., Prasetya G., Annunziato A., Proietti C., Probst P., Paparo M.A., Wronna M., Zaytsev A., Pronin P., Giniyatullin A., Putra P.S., Hartanto D., Ginanjir G., Kongko W., Pelinovsky E., and Yalciner A.C. The September 28th, 2018, Tsunami In Palu-Sulawesi, Indonesia: A Post-Event Field Survey // *Pure and Applied Geophysics*, 2019 Springer Nature Switzerland AG.
<https://doi.org/10.1007/S00024-019-02145-Z>
2. Roberts N.J., McKillop R.J., Lawrence M.S., Psutka John F., Clague John J., Brideau M.-A., and Ward Brent C. Impacts of the 2007 Landslide-Generated Tsunami in Chehalis Lake, Canada // *The Second World Landslide Forum*. Rome, Italy, 3–9 October 2011. P. 133–140.
3. Геосистемы Дальнего Востока России на рубеже XX–XXI веков. Т. 1. Природные геосистемы и их компоненты. Владивосток: Дальнаука, 2008. 428 с.
4. Махинов А.Н., Поздняков А.В., Гусев М.Н., Помигуев Ю.В. Крупный оползень в долине р. Зеи // *География и природные ресурсы*. 1993. № 1. С. 175–177.
5. Пинегина Т.К., Делемень И.В., Дроздин В.А., Калачева Е.Г., Чирков С.А., Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Леонов В.Л., Селиверстов Н.И. Камчатская Долина гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. // *Вестник ДВО РАН*. 2008. № 1. С. 33–44.
6. Крамарева Л.С., Луян Е.А., Амельченко Ю.А., Бурцев М.А., Крашенинникова Ю.С., Суханова В.В., Шапилова Ю.А. Наблюдение зоны обрушения сопки в районе реки Бурея 11 декабря 2018 года // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 7. С. 266–271.
7. Махинов А.Н. Оползень и цунами на реке Бурея 11 декабря 2018 года // *Природа*. 2019. № 4. С. 12–22.
8. Геологическая карта СССР. масштаб 1:200 000. Серия Хингано-Буреинская. Лист М-52-ХVIII. М.: Госгеолтехиздат, 1962.
9. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Гл. ред. Э.Л. Ершов. М.: Недра, 1989. 515 с.
10. Кондратьева Л.М. Бурейский оползень и экологические риски // *Вестник ДВО РАН*. 2019. № 2. С. 45–55.

Large tsunami-generated landslide in the Bureysky Reservoir

A. N. Makhinov^{a, #}

^a Institute of Water and Environmental Problems FEB RAS, Khabarovsk, Russia

[#]E-mail: amakhinov@mail.ru

The structure, parameters, causes and consequences of a large landslide with a volume of 24.5 million cubic meters on the steep slope of the Bureysky Reservoir in its narrow mountain region (Khabarovsk Krai) were established. The displacement of the earth masses occurred on December 11, 2018 at an air temperature below minus 30°C. It was revealed that the cause of the landslide was a combination of factors, such as high steepness of the slope, the presence of highly fractured rocks in a zone of tectonic crushing, melting permafrost and the flooding of the soil at the bottom of the slope. As a result of the displacement of the landslide, a dam with a length of 800 m and a height of up to 47 m above the water level was formed, dividing the reservoir into two isolated parts. Heterogeneity of the composition of the deposits of the landslide body, a significant part of which is permafrost, was revealed.

The landslide caused a tsunami wave, which spread along the reservoir for 11 km in both directions along the Bureya River valley and for 3.2 km along the valley of the Sr. Sandar river located opposite the landslide. The maximum height of the wave splash reached 90 m in

the narrow part of the valley in the middle reaches of the river Sr. Sandar. The wave completely destroyed the forest on an area of 300 hectares and washed away slope deposits at an area of about 100 hectares. On the slopes, numerous erosion furrows were formed up to 20 m long and up to 1.2 m deep. Now on a wall of failure collapses and small landslides became more active.

The role of anthropogenic factors in the formation of landslides is the warming effect of water on the frozen rocks at the base of the steep slope of the valley as a result of rising water levels when filling the reservoir Bureyskaya HPP.

Keywords: Bureysky reservoir, landslide, disruption wall, landslide body, morphology, modern processes

REFERENCES

1. Omira R., Dogan G.G., Hidayat R., Husrin G., Prasetya G., Annunziato A., Proietti C., Probst P., Paparo M.A., Wronna M., Zaytsev A., Pronin P., Giniyatullin A., Putra P.S., Hartanto D., Ginanjir G., Kongko W., Pelinovsky E., and Yalciner A.C. The September 28th, 2018, Tsunami In Palu-Sulawesi, Indonesia: A Post-Event Field Survey // Pure and Applied Geophysics, 2019 Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/S00024-019-02145-Z>.
2. Roberts N.J., McKillop R.J., Lawrence M.S., Psutka John F., Clague John J., Brideau M.-A., and Ward Brent C. Impacts of the 2007 Landslide-Generated Tsunami in Chehalis Lake, Canada // The Second World Landslide Forum. Rome, Italy, 3–9 October 2011. P. 133–140.
3. *Geosistemy Dalnego Vostoka Rossii na rubezhe XX–XXI vekov. T. 1. Prirodnye geosistemy i ikh komponenty* (Geosystems of the Russian Far East at the turn of the XX–XXI centuries. Vol. 1. Natural geosystems and their components). Vladivostok: Dalnauka (Publ.), 2008. 428 p.
4. Makhinov A.N., Pozdnyakov A.V., Gusev M.N., and Pomiguyev Yu.V. *Krupnyi opolzen' v doline r. Zei* (Large landslide in the valley of the river Zeya). *Geografiya i prirodnye resursy*. 1993. No. 1. P. 175–177. (in Russ.)
5. Pinegin T.K., Delemen I.V., Droznin V.A., Kalacheva E.G., Chirkov S.A., Melekestsev I.V., Dvigalo V.N., Leonov V.L., and Seliverstov N.I. *Kamchatskaya Dolina geizerov posle katastrofy 3 iyunya 2007 g.* (Kamchatka Valley of Geysers after the disaster on June 3, 2007). *Vestnik DVO RAN*. 2008. No. 1. P. 33–44. (in Russ.)
6. Kramareva L.S., Lupyan Ye.A., Amel'chenko Yu.A., Burtsev M.A., Krashenninnikova Yu.S., Sukhanova V.V., and Shamilova Yu.A. *Nablyudenie zony obrusheniya sopki v raione reki Bureya 11 dekabrya 2018 goda* (Observation of the collapse zone of the hills near the Bureya River on December 11, 2018). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. Vol. 15. No. 7. P. 266–271. (in Russ.)
7. Makhinov A.N. *Opolzen' i tsunami na reke Buree 11 dekabrya 2018 goda* (A landslide and tsunami on the Bureya river on December 11, 2018). *Priroda*. 2019. No. 4. P. 12–22. (in Russ.)
8. *Geologicheskaya karta SSSR. Masshtab 1:200 000. Seriya Khingano-Bureinskaya. List M-52-XVIII* (Geological map of the USSR on a scale of 1:200 000. Series Khingano-Bureinskaya. Sheet M-52-XVIII). M.: Gosgeoltekhizdat (Publ.), 1962.
9. *Geokriologiya SSSR. Vostochnaya Sibir' i Dalnii Vostok* (Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East). E.L. Ershov (Ed.). M.: Nedra (Publ.), 1989. 551 p.
10. Kondratyeva L.M. *Bureiskii opolzen' i ekologicheskie riski* (Bureisk landslide and environmental risks). *Vestnik DVO RAN*. 2019. No. 2. P. 45–55. (in Russ.)