

УДК 551.435.3(470.51)

МАССОВОЕ СМЕЩЕНИЕ ОБЛОМОЧНОГО МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ ОСУШКИ ВОТКИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (р. КАМА)[#]

© 2024 г. И. Е. Егоров^{1*}, И. В. Глейзер¹, И. И. Григорьев^{1**}, А. Г. Казаков¹¹ Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

*E-mail: egorov.i53@mail.ru

**E-mail: ivangrig@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.02.2023 г.

После доработки 01.09.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2024 г.

Изложены методы и результаты полевых исследований процессов массового смещения обломочного материала, проведенных на стационаре в зоне осушки на правом берегу Воткинского водохранилища в районе с. Галёво. Они включают в себя наблюдения за разрушением стенок обвално-осыпных склонов, сложенных преимущественно алевритами, подрезаемых абразией, а также за особенностями смещения обломков. Темпы разрушения склонов определены с помощью высокоточной тахеометрической съемки в безотражательном режиме, скорости смещения обломков вычислены по результатам массовых замеров их положения на снимках, полученных с БПЛА и топогеодезической съемки. В пределах прибрежного мелководья впервые установлены и количественно оценены скорости медленного массового смещения материала, поступающего на отмель за счет разрушения берегов. Основной вклад в объеме рыхлого материала, поступающего в чашу водохранилища на данном участке, дают процессы осыпания. Скорость отступания склона составляет 14–15 см/год, что дает величину поступления колювия к его подножью в объеме 6.6–7 м³ на погонный метр в год. Поэтому физическое выветривание приобретает в условиях водохранилища значение важнейшего фактора изменения надводной части береговых геоморфосистем, наряду с абразией. Формирование же основных литодинамических потоков подводных участков мелководья береговой зоны связано с разнообразными процессами — волновой деятельностью, массовым движением материала в подводных условиях и т. д. Зафиксировано, что слой рыхлых наносов, выстилающий мелководье слоем в несколько десятков сантиметров перед ледоставом, сползает в зоне осушки на расстояние до 15–20 м к началу весеннего сброса воды. Также установлен факт смещения и валунов, скорости движения которых в основном укладываются в диапазоне 10–20 см/год. Массовое смещение мелкозем в летнее время компенсируется поступлением продуктов осыпания, обваливания и абразии. Полученные данные могут использоваться для оценки роли различных процессов на мелководье водохранилища и при расчетах темпов заиления его чаши.

Ключевые слова: алевриты, осыпание, обваливание, абразия, литодинамические потоки

DOI: 10.31857/S2949178924020067, EDN: PNVTRU

ВВЕДЕНИЕ

Явление медленного массового смещения материала на склонах было установлено геоморфологами еще в конце XIX в., правда, без объяснения причин и механизма сползания. В 1909 г. Дж. Жильбер дал определение механизма этого процесса, получившего

название “крип” (англ. creep — ползти), которого в основном придерживаются в настоящее время — сползание вызвано изменениями объема поверхностного слоя рыхлых пород при чередовании их замерзания и протаивания, увлажнения и высыхания, нагревания и охлаждения, а также воздействием корней растительности и землеройных животных (Auzert, 1982). При этом позднее в ряде общетеоретических работ массовым медленным движениям грунта отводилась в целом несущественная роль. Это обстоятельство отчасти объясняет, почему стационарные полевые и экспериментальные исследования этого процесса были предприняты только во второй половине XX в. Действительно, крип обычно

[#] Ссылка для цитирования: Егоров И.Е., Глейзер И.В., Григорьев И.И., Казаков А.Г. (2024). Массовое смещение обломочного материала в зоне осушки Воткинского водохранилища (р. Кама). *Геоморфология и палеогеография*. Т. 55. № 2. С. 126–137. <https://doi.org/10.31857/S2949178924020067>; <https://elibrary.ru/PNVTRU>

характеризуется невысокой скоростью смещения пород, отсутствием коррелятных отложений и слабо выраженным геоморфологическим результатом.

Первые результаты наблюдений за крипом были получены А. Янгом в Англии в начале 1960-х гг., а в 1964 г. — в нашей стране казанскими геоморфологами под руководством А.П. Дедкова в Среднем Поволжье (Дедков, Дуглав, 1967). Позднее организация подобных исследований была осуществлена в других регионах.

По мнению А.А. Ажигирова и В.Н. Голосова (Ажигиров, Голосов, 1990), особую группу поверхностей с активным проявлением крипа составляют овражные склоны, на которых происходит перемещение материала вследствие подрезания подножий склонов образующимися в оврагах потоками при снеготаянии и в период выпадения ливней. В этом случае регулярно возникает дефицит материала, выполняющего роль подпора. В результате скорость смещения почвогрунтов возрастает более чем вдвое, по сравнению с остальными склонами.

Со временем проявление массового смещения пород было выявлено не только на склонах речных долин и оврагов, но и на других элементах рельефа. Смещение материала наблюдается в днищах балок, несмотря на небольшие уклоны поверхности. Если скорость крипа на склонах составляет несколько миллиметров в год (на Русской равнине обычно не более 3—5 мм/год), то в днищах балок она уже составляет в год несколько сантиметров. При этом, по нашим данным, скорость смещения увеличивается от бортов балки к ее центру, где достигает 3.5—4 см/год (Егоров и др., 2018).

Казанскими геоморфологами было выявлено смещение вязкопластичного грунта на поймах малых рек Востока Русской равнины (Мозжерин и др., 2002). Наблюдения, проведенные в днищах малых рек, расположенных в разных природных зонах от степи до северной тайги, показали, что в них идет процесс, схожий со склоновым крипом. Скорости смещения грунта по уклону днища составили от 10 до 100 см за 15 лет (т.е. до 6.7 см/год). Наибольшие смещения отмечены возле русел рек (Мозжерин и др., 2002).

Практически не изучены причины и механизм медленного смещения рыхлого покрова в подводных условиях. Под водой нет большинства имеющихся на суше факторов сноса — циклов режеляции, увлажнения-высыхания, нагревания-охлаждения пород. Отсутствует и расклинивающее действие корней растительности. Тем не менее, грунты под водой интенсивно перемещаются. Например, Б.П. Агафонов (1986) зарегистрировал в прибрежной зоне на Бай-

кале движение верхнего слоя осадков со скоростью до 100 см/год. Там же он ссылается на наблюдения, сделанные в Калифорнийском заливе, где на глубине 24 м зафиксирована скорость смещения грунта до 60 см в месяц на поверхности и 30 см в основании 6.4-метровой толщи наносов.

Таким образом, явление сползания грунтов оказывается процессом универсальным, имеющим повсеместное распространение. Также очевидно, что скорости массового смещения грунтов могут определяться не только факторами, вызывающими периодические изменения их объема, особенно характерными для склонов, но и другими причинами.

Потенциальную величину смещения горных пород на склонах можно определить по амплитуде их вертикальных гидротермических движений. Натурные измерения на склонах, однако, обычно показывают результаты меньше расчетных. Это объясняется влиянием сил сцепления между частицами, не дающими опускаться грунту строго по вертикали. Уклоны днищ балок и малых рек намного меньше, чем у склонов, а скорости смещения грунтов на порядок выше, что свидетельствует о том, что гидротермические объемные движения грунтов здесь имеют явно второстепенное значение. В данном случае смещение обусловлено, по всей видимости, дефлюкцией, медленным перемещением сильно увлажненных пластичных грунтов (Воскресенский, 1971), в сочетании с обычным крипом. Как отмечает Д.Г. Панов (1966), дефлюкция, в противоположность солифлюкции, характерна для областей гумидного климата. Смещение же рыхлых пород в подводных условиях, очевидно, могут быть вызваны только другими причинами, и термины, обозначающие массовое смещение пород на склонах и в днищах временных и постоянных русловых потоках для подводных условий не подходят.

Стационарные наблюдения за крипом, проведенные к настоящему времени в различных климато-ландшафтных обстановках, позволяют пересмотреть вопрос о значимости этого процесса. В частности, отмечается, что крип способствует развитию оползней пластического течения, может вызывать подвижки опор мостовых переходов, деформации дорожного полотна (Ажигиров, Голосов, 1990), может быть спусковым механизмом оползневых обрушений и формирования террасет (Moeuersons, 1989), является одной из причин порывов промышленных нефтепроводов (Стурман и др., 2002). Движение грунтовых масс может вызывать перемешивание и гомогенизацию почвообразующих пород, ускоряет процессы выветривания в смешивающейся толще

(Бергкаут, Белоусова, 1985). Отмечается также, что крупномасштабные процессы крипа способны играть решающую роль в формировании вершинных депрессий в горах (Табор, 1971). Отсюда следует, что изучение процессов массового смещения рыхлых пород (не только крипа) является весьма актуальным, особенно это касается подводных условий, поскольку помимо результатов единичных наблюдений, приведенных выше, о подводном массовом смещении материала пока мало что известно.

Учитывая большие объемы рыхлого материала, регулярно поступающего с абразионно-осыпных склонов, отсутствие эффекта накопления рыхлых отложений у подножья и на мелководье, следует предположить, что механизм перемещения наносов в подводных условиях весьма эффективен. Поскольку литопотоки на мелководье характеризуются высокими скоростями и охватывают значительные объемы горных пород, подводное массовое смеще-

ние пород может оказаться одним из ведущих процессов переформирования рельефа береговой зоны водохранилищ. Целью настоящего исследования является предварительная оценка роли процессов массового смещения рыхлых пород в подводных условиях на материалах изучения одного из участков берега Воткинского водохранилища.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Наблюдения за скоростью отступления берега и медленными массовыми смещениями грунта проводились на мелководье Воткинского водохранилища на стационаре в районе с. Галёво Воткинского района Удмуртской Республики (рис. 1) начиная с 2015 г. На береговом участке длиной более 50 м на мелководье во время сброса воды на водохранилище были закреплены реперы — стержни из арматуры, забитые



Рис. 1. Местоположение объекта наблюдений и расположение однотипных берегов Воткинского водохранилища в пределах Удмуртии.

Fig. 1. The location of the observation object and the location of the same type of shores of the Votkinsk reservoir within Udmurtia.



Рис. 2. Работа навигационного оборудования на реперных точках.

Fig. 2. Operation of navigation equipment at reference points.

в грунт. Координаты реперов регулярно проверялись с помощью высокоточного навигационного оборудования (рис. 2).

Надводная часть стационара представлена абразионно-осыпным склоном юго-восточной экспозиции, высотой от 30 до 47 м, сложенным коренными алеврититами с небольшими линзами песчаника. Крутизна склона $48\text{--}50^\circ$, в местах выхода песчаника — $62\text{--}67^\circ$. Морфология склона и его сложение типичны для правобережья водохранилища в пределах Удмуртии и представляют до 60 % всех его берегов. Скорость разрушения склона определялась повторной тахеометрической съемкой положения бровки и сканированием его поверхности с помощью тахеометра, работающего в безотражательном режиме с установленных реперов.

Склон подводного мелководья ровный, прямой, крутизной $4\text{--}5^\circ$, полностью сложен коренными алеврититами. Обычно поверхность коренных алеврититов, за исключением периода весеннего сброса воды на водохранилище, бывает перекрыта маломощным подвижным слоем рыхлых отложений. Скорость размыва коренных пород прибрежной отмели определялась методом шпилек, забитых в грунт по створам на разном удалении от подножья абразионно-осыпного склона. Скорость и направление смещения

обломков горных пород на прибрежном мелководье определялись различными методами. Первоначально это было сделано с помощью меток — просверленных отверстий на поверхности крупных обломков. В дальнейшем, при проведении повторной высокоточной тахеометрической съемки, вычислялись новые координаты этих меток. Подобная методика применялась с 2015 по 2020 гг. Такой прием оказался недостаточно эффективным не столько из-за сравнительно высокой трудоемкости, сколько из-за сложности поиска и идентификации обломков. Тем не менее, некоторые предварительные результаты удалось этим методом получить, и они были опубликованы (Егоров и др., 2018; 2019).

Начиная с 2020 г. для определения величины смещения обломков были использованы материалы съемок прибрежного мелководья с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в период сброса воды и отсутствии ледового покрова в зоне осушки — в третьей декаде апреля (рис. 3). При этом проводилось координирование меченых ранее обломков для сопоставления результатов, полученных разными методами. Съемка производилась с небольшой высоты — 20 м, все снимки в дальнейшем привязывались к единой системе координат, вычисляемой по имеющимся реперам. Плано-высотные координаты

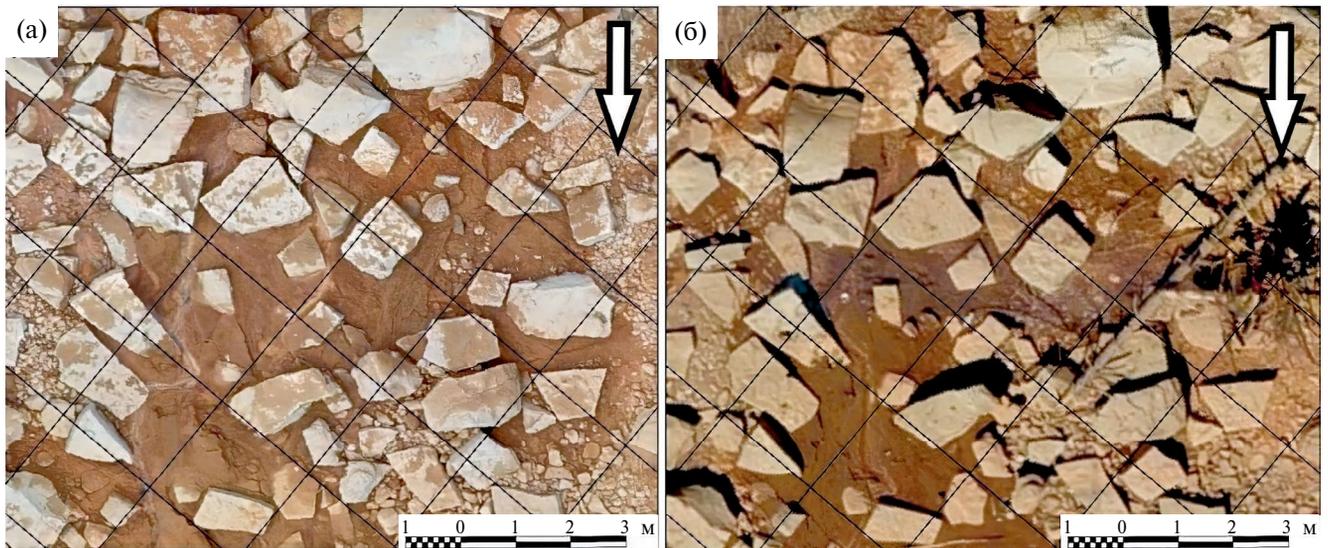


Рис. 3. Аэрофотоснимок фрагмента прибрежной полосы Воткинского водохранилища (координатная сетка проведена через 2 м, стрелкой указано направление уклона): (а) — 2021 г., (б) — 2022 г.

Fig. 3. Aerial view of a fragment of the coastal strip of the Votkinsk reservoir (the coordinate grid is drawn through 2 meters, the arrow indicates the direction of the slope): (a) — 2021 year, (б) — 2022 year.

реперов ежегодно вычислялись заново, чтобы исключить потенциальную ошибку измерений вследствие возможного их смещения. На распечатанные снимки выносилась координатная сетка, относительно которой и определялись в дальнейшем величины смещения. Для подсчетов выбирались только обломки, надежно идентифицированные на разновременных снимках по их контурам и расположению относительно друг друга. Точность измерений составила ± 1 см. Затем все данные заносились в таблицы и классифицировались по разным признакам — размеру обломков, расстоянию относительно подножья осыпного склона, характеру смещения и поверхности скольжения. Фиксировались смещения по падению склона и общие величины смещения с учетом боковых движений. Всего были получены данные по почти 150 обломкам, что позволяет, на наш взгляд, делать достаточно достоверные выводы о характере и скорости их движений в подводных условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Процессы осыпания выветрелых пород склона являются главным источником поступления рыхлого материала на мелководье. Основная масса коллювия представлена обломками размерности дресвы и более тонким материалом, в основном продуктами выветривания алевролитов. К рыхлому коллювию на мелководье добавляются щебень и глыбы, эти фракции в основном содержатся не в самой осыпи,

а скатываются дальше ее подножья и представлены преимущественно песчаником. В результате поверхность склона испытывает параллельное отступление со средней скоростью 14—15 см/год. Поверхность осыпного склона не идеально ровная, и в годовом итоге одни участки отстают сильнее, чем другие. На следующий год активное разрушение наблюдается на других участках, а в многолетнем режиме профили склона оказываются отчетливо параллельными друг другу. Разброс значений отступления за год на профиле составил от 5 до 23 см/год (рис. 4). В результате к подножью самого высокого участка склона на стационаре поступает на каждый погонный метр 6.6—7 м³ пород. Весной у подножья склонов образуются мощные шлейфы коллювия, иногда высотой 4—5 м. Эти шлейфы впоследствии быстро размываются, и уже в конце мая весь коллювий оказывается под водой, а в коренных породах подножий осыпных склонов начинает формироваться неглубокая волноприбойная ниша. В годовом режиме процессы осыпания развиваются неравномерно. Основную массу осыпи дает весенний период — 70—75% годового объема. Прочие максимумы развития процессов осыпания могут проявляться в разные месяцы летне-осеннего периода и совпадают в основном с пиками выпадения осадков (Агафонов, 1981).

Образовавшийся весной коллювий после повышения уровня воды на водохранилище постепенно распределяется по мелководью слоем толщиной 20—30 см. Смещение рыхлых отложений на мелководье

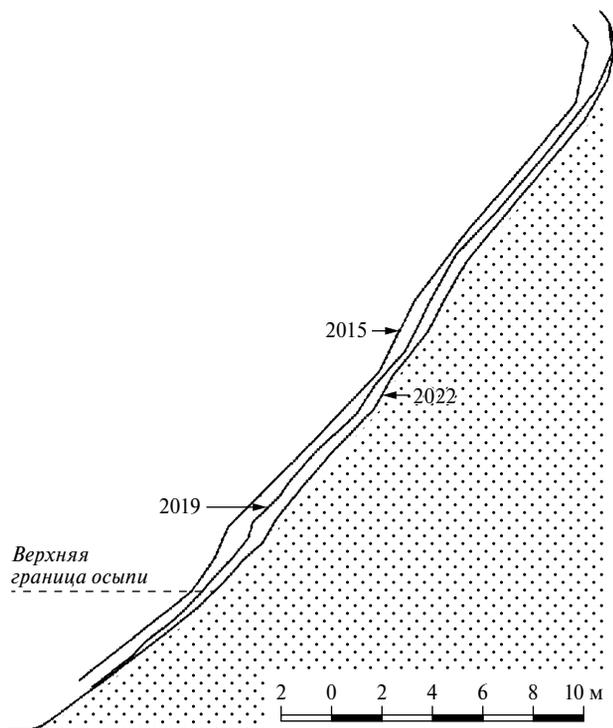


Рис. 4. Динамика вертикального профиля на стационаре по результатам сканирования с 2015 по 2022 гг.

Fig. 4. Dynamics of the vertical profile at the hospital according to the results of scanning from 2015 to 2022 years.

компенсируется поступлением нового материала. Характеристики слоя рыхлых отложений периодически отмечались во время осеннего сброса воды на водохранилище. Следует отметить, что осенний сброс часто бывает весьма незначительным, обычно осушается всего 2—3 м мелководья, реже — 20—25 м и более. Весной зона осушки всегда больше 50 м. У подножья склона слой рыхлых пород всегда толще, что можно объяснить поступлением нового материала со склона и гидродинамическими процессами во время сильных волнений на водохранилище, при которых рыхлый материал не столько уносится на глубину, сколько выносится на мелководье. С этими процессами, как отмечает Б.П. Агафонов (Агафонов, 2005), связано также образование штормовых валов. На водохранилище такие валы сохраняются на мелководье только тогда, когда формируются при несколько сниженном уровне воды перед ледоставом.

О характере движения рыхлых отложений в отсутствие поступления нового материала дают представление результаты обследования мелководья после весеннего сброса воды. На расстоянии до 18—20 м от подножья осыпного склона практически отсут-

ствует рыхлый материал песчаных и алевритовых фракций. В основном присутствует крупная древесина и щебень, а также валуны и глыбы. Поскольку в разрезе коренного склона на долю песчаников, являющихся источником наиболее крупных обломков, приходится лишь от 1 до 2% профиля, ежегодно пополняемая часть валунно-глыбового материала не столь велика, как мелкозем, источником которого выступают доминирующие на склоне алевролиты.

На обнажающихся после весеннего сброса воды участках осушки хорошо видно, что рыхлый материал находится только у подножья абразионно-осыпного склона, промерзающего в период ледостава, а далее на поверхность выходят коренные размываемые алевролиты (рис. 5). Поскольку перед ледоставом поверхность была покрыта мелкоземом, это может быть объяснено, с нашей точки зрения, только массовым смещением материала в подводных условиях. Удаление рыхлого материала происходило в период ледостава, поэтому влияние гидродинамических факторов, таких как волнение, исключено. Заметные на снимке (рис. 5) крупные обломки — результат активизации обвално-осыпных процессов в начале весны. В начале марта начинается сброс воды, уровень снижается и лед постепенно ложится на поверхность осушки. При осыпании с коренного склона наиболее крупные обломки (обычно представленные песчаником) скатываются гораздо дальше мелкозема, составляющего основную массу коллювия. По мере таяния льда обломки проецируются на поверхность осушки.

Судя по ширине прибрежной полосы, лишенной чехла рыхлых наносов, расстояние, на которое происходит смещение наиболее мелких фракций рыхлых отложений, может достигать 20 м и более. Слой рыхлых наносов весной сохраняется только у подножья абразионно-осыпного склона, поскольку промерзает в период ледостава. Учитывая продолжительность ледостава и дальность переноса, скорость смещения рыхлых отложений наиболее мелких фракций может составлять от 3 до 4 м/мес.

Смещение рыхлого материала в подводных условиях отмечено в ряде работ, посвященных геодинамике побережий камских водохранилищ (Назаров, 2007; 2008 и др.). В частности, Н.Н. Назаров, отмечая важную роль выноса минеральных веществ в глубоководье при различных типах локального морфолитогеоза, указывает на существование трех вариантов динамических обстановок преобразования рельефа и осадконакопления — связанных с проточными течениями, волновыми процессами и их сочетанием (Назаров, 2008). Не отрицая роли указанных обстановок, надо признать, что объяснить



Рис. 5. Прибрежное мелководье после сброса воды на Воткинском водохранилище.

Fig. 5. Coastal shallow water after water discharge at the Votkinsk reservoir.

смещение материала в подводных условиях только волновыми процессами и проточными течениями невозможно. Во время ледостава волнение отсутствует. Проточные течения, способные удалить значительные по объему и массе толщи пород, должны быть достаточно сильными. При этом в створе небольшой балки, расположенной в двух десятках метров выше от стационара, прекрасно сохраняется совершенно не нарушенная рябь волнения, образовавшаяся на поверхности еще до ледостава. Ненарушенную рябь волнения мы отмечали и на других участках мелководья — в створах эрозионных форм разного размера, и у берегов, сложенных суглинками. Рябь течения нами нигде не встречалась, хотя отсутствие рыхлых наносов после ледостава, причем не только глинисто-песчаных фракций, наблюдается повсеместно. В подводных условиях рыхлый грунт постоянно находится в вязко-пластичной консистенции,

что позволяет развиваться дефлюкции, как в случае с днищами балок и поймами малых рек. Но в отличие от днищ временных и постоянных русловых потоков, уклоны подводных склонов существенно выше, насыщенность грунтов водой постоянная, а не периодическая, что и дает в итоге более высокие скорости смещения. Возможно, некоторый вклад в смещение материала вносит таяние снега и льда в зоне осушки. Хотя весенние наблюдения показали, что вода талого снега стекает практически полностью по поверхности льда, а следы струй воды присутствуют только в местах выхода подземных вод на абразионно-осыпном склоне и в области некоторых трещин на поверхности льда, образующихся после сброса воды и укладывании льда на поверхность зоны осушки. Но это может привести к сносу материала только вдоль достаточно редких линий стока, но никак не по всей поверхности.

Крупные обломки также смещаются, что установлено с помощью точной тахеометрической съемки. Было зафиксировано, что скорость перемещения обломков зависит от их размера. Крупные уплощенные валуны песчаника размерами 50×50 см перемещались со скоростью около 4 см/год, максимальная скорость составила 16 см/год. У валунов размерами в первые десятки сантиметров скорость движения оказалась равной 10–11 см/год, наибольшее зарегистрированное смещение составило 52 см/год (Егоров и др., 2018). Было отмечено, что смещение крупных обломков происходит год от года неравномерно, а под действием надвига льда обломки иногда могут двигаться даже вверх по склону мелководья. Единичный случай выноса материала в связи с надвигом льда и образованием вала наносов был зарегистрирован нами в 2017 г.

Надо отметить, что все геодезические измерения были выполнены только для обломков, достаточно удаленных от подножья склона — более 6 м, а количество измерений оказалось небольшим — в разные годы от 10 до 15 (общее количество меченых обломков — около 40). Это связано, прежде всего, с кольматированием просверленных отверстий и поверхностей валунов тонкими наносами, что делает их поиски весьма затруднительными, особенно в присклоновой части мелководья. Если же обломок не наблюдался несколько лет, то возникали проблемы с его идентификацией, учитывая возможные значительные скорости смещения.

Интересные закономерности показали результаты, полученные с использованием БПЛА. Четко выражено уменьшение скорости смещения по мере удаления валунов от подножья абразионно-осыпного склона (табл. 1). Особенно разница заметна по об-

щему смещению обломков — почти в два раза. Это можно объяснить неодинаковыми вибрационными воздействиями от прибоя волн, вызывающими ослабление связей между продуктами выветривания, между валунами и подстилающим субстратом. Разумеется, виброэффект ослабевает по мере удаления от зоны прибоя. Важность учета этого фактора для подводных условий ранее отмечал Б.П. Агафонов (Агафонов, 1986). Заметно меняется также доля боковых смещений от общей их величины по мере удаления от зоны прибоя. Если в самой верхней части мелководья на долю боковых смещений приходится примерно 14% общего смещения, то на расстоянии более 8 метров — уже только 6.5%. Возможно, боковые смещения вызваны различными углами подхода волн к берегу. Интересно отметить, что смещений валунов вправо и влево относительно падения подводного склона выявлено примерно одинаковое количество.

Отчетливо проявляется разница в скорости смещения в зависимости от того, на какой поверхности находится валун. Находящиеся непосредственно на коренных алевролитах валуны смещаются почти в два раза медленнее, при этом доля боковых смещений у них выше. Очевидно, в данном случае важную роль играет характер микрорельефа неровной кровли алевролитов. Валуны, лежащие на более мелких обломках, смещаются с максимальными скоростями — в зоне прибоя более 24 см/год (табл. 2). Максимальная зарегистрированная скорость смещения отдельных валунов составила 54 см/год, еще один валун смещался со скоростью 47 см/год, и три валуна — 40 см/год. В данном случае обломки в рыхлой толще подводного склонового чехла кроме собственной тяжести испытывают дополнительный сдвиг

Таблица 1. Характеристики смещения валунов в зависимости от расстояния от подножья склона

Table 1. Characteristics of the displacement of boulders depending on the distance from the foot of the slope

Расстояние от валуна до подножья склона, м	Менее 4	От 4 до 6	От 6 до 8	Более 8
Количество валунов, шт.	26	46	55	23
Средняя величина смещения валуна по падению склона, см	17.6	14.2	13.6	10.2
Общая величина смещения, с учетом бокового движения, см	20.4	15.8	13.9	10.9

Таблица 2. Средние величины смещения валунов в зависимости от подстилающей поверхности

Table 2. Average values of displacement of boulders depending on the underlying surface

Расстояние от подножья склона, м		Менее 4	От 4 до 6	От 6 до 8	Более 8
Крупные валуны перемешаны с рыхлыми наносами	Количество валунов, шт.	14	23	18	12
	Общая величина смещения, см	24.1	18.6	22.8	15.2
Валуны залегают на коренных алевролитах	Количество валунов, шт.	12	23	37	11
	Общая величина смещения, см	10.0	9.8	9.1	6.1

от давления вышележащих масс валунов, которое способствует увеличению скорости перемещения и самих обломков, и находящихся выше валунов.

Движение крупных валунов в подводных условиях может быть связано не только с отмеченным уже виброэффектом, но и с процессами аблювиации — результатом смыва тонких частиц грунта вокруг обломка, в результате обмывания его стоком при откате волны. Такой механизм смещения крупных обломков был описан ранее Н.И. Маккавеевым и А.М. Калинин (1969), и иногда называется еще “стоковым крипом” (Тимофеев, 1978). Аблювий — крупнообломочные остаточные отложения (щебень, глыбы), оставшиеся на мелководье вследствие удаления мелкозема, мы и наблюдаем в зоне осушки. Движение валунов может быть вызвано дефлюкционным смещением размокших алевролитов, на которых они залегают. Также, возможно, некоторый вклад в общий результат смещения валунов вносят ледовые массы, лежащие на них в зоне осушки при сбросе воды на водохранилище.

Подводный склон также разрушается. Алевролиты размокают и постепенно размываются. Зарегистрированная по профилям скорость снижения поверхности подводного склона составляет 2—2.5 см/год. Размокшие в подводных условиях алевролиты выполняют роль смазки, обеспечивающей скольжение валунов.

Размеры валунов с зафиксированными скоростями смещения различны. Самые крупные — 135×62 см, 110×102 см и 117×58 см; самые маленькие — 21×20 см, 22×16 см, 27×18 см. При этом два из трех самых крупных валунов сместились на 23 см/год, а все самые маленькие — на 14—15 см/год. Разделение валунов по размеру не выявило существенных различий по величине смещений. Гораздо большее значение имеет расположение валунов относительно зоны прибоя. Малая выборка в первых наблюдениях не позволила однозначно оценить влияние как размера валуна, так и особенностей их расположения. При этом результаты, полученные с использованием аэрофотосъемки, соответствуют данным высокоточной тахеометрической съемки, позволившей на первом этапе зафиксировать сам факт смещения. Представляется необходимым при проведении работ совмещать оба метода. Тахеометрический метод в данном случае необходим не для массового сбора данных, а для контроля за точностью измерений.

Большой объем выборки показал, что для смещения валунов большое значение имеет не только близость их к зоне прибоя, но и характер поверхности, по которой происходит смещение. Вместе с тем недооценивать влияние фактора размера обломков

нельзя — смещение мелкозема, дресвы и щебня происходит с гораздо более высокими скоростями. На скорость смещения обломочного материала существенное влияние оказывает его дисперсность, и соответственно возможность насыщения водой. С ростом дисперсности и при достаточном увлажнении, вязкость грунтов уменьшается (Поздняков, Ройхвагер, 1980). Роль степени водонасыщения как ведущего фактора смещения рыхлых отложений в субаэральных условиях отмечается во многих исследованиях (Агафонов, 1986, Harris, 1972, Swanston, 1981 и др.). Для подводных условий этот фактор проявляется в наибольшей степени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования смещения материала на мелководье водохранилища позволяют сделать следующие выводы:

1. В подводных условиях, даже в отсутствие волнений в период ледостава, наблюдаются процессы массового смещения рыхлых отложений. Они охватывают не только песчано-глинистые фракции продуктов выветривания, но и валунно-глыбовый материал. Скорость смещения разных фракций сильно различается. Песчано-глинистая фракция смещается со скоростью 4—5 м/год, валуны и глыбы — в основном от 10 до 20 см/год.

2. Скорость смещения крупных обломков уменьшается по мере удаления от зоны прибоя волн, вызывающих аблювиацию и вибрацию грунта, ослабляющих сцепление его частиц между собой. Соответственно, валуны смещаются намного быстрее, если залегают не на коренном субстрате, а на рыхлых наносах.

3. В зоне прибоя волн, помимо смещения по падению склона, наблюдаются боковые смещения крупных обломков, обусловленные особенностями микрорельефа поверхности и направлениями подхода волн. По мере удаления от зоны прибоя доля боковых смещений снижается.

4. Основным источником поступления рыхлого материала на мелководье водохранилища являются процессы осыпания. С наклонных подводных участков береговой зоны этот материал удаляется процессами массовыми движений, дефлюкцией.

5. Берега разрушаются путем параллельного отступания как подводной, так и надводной его частей. Надводной части — со скоростью 14—15 см/год, подводной — 2—2.5 см/год. В настоящее время скорость берегоразрушения остается стабильно высокой, что делает необходимым пересмотр некоторых теорети-

ческих положений, касающихся закономерностей развития берегов и прогнозных оценок.

6. Полученные результаты позволяют пересмотреть роль массовых смещений грунта в спектре экзогенных процессов, по крайней мере, в подводных условиях. Именно подводное массовое смещение удаляет обломочный материал, поступающий на подводный береговой склон с коренных абразионно-осыпных склонов.

Результат полевых исследований убедительно свидетельствует о наличии массового смещения отложений в подводных условиях, однако окончательная интерпретация результатов и оценка отдельных факторов этого процесса требует разработки отдельной методики наблюдений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00194. <https://rscf.ru/project/23-27-00194>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агафонов Б. П. (1981). Процесс отступления свежесформированных уступов на склонах. *География и природные ресурсы*. № 4. С. 37—45.

Агафонов Б. П. (1986). О природе медленного смещения рыхлого покрова. *Известия АН СССР. Серия географическая*. № 4. С. 55—64.

Агафонов Б. П. (2005). Восходящие литопотоки в формировании берегов озер (на примере Байкала). В сб.: *Новые и традиционные идеи в геоморфологии. V Шукшинские чтения*. М.: Географический факультет МГУ. С. 197—199.

Ажигиров А. А., Голосов В. Н. (1990). Оценка медленных смещений почвенно-грунтовых масс при инженерно-географических исследованиях. *Геоморфология*. № 1. С. 33—40.

Беркгаут В. В., Белоусова Н. И. (1985). Движение почв по склонам и почвы. *Геоморфология*. № 1. С. 57—65.

Воскресенский С. С. (1971). Динамическая геоморфология. Формирование склонов. М.: МГУ. 229 с.

Дедков А. П., Дуглав В. А. (1967). Медленное движение почвенно-грунтовых масс на задернованных склонах. *Известия АН СССР. Серия географическая*. № 4. С. 90—93.

Егоров И. Е., Глейзер И. В., Казаков А. Г. (2018). Скорости медленного массового смещения грунтов в надводных и подводных условиях водосборного бассейна. В сб.: *Тридцать третье пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов (г. Нижневартовск, 2—4 октября 2018 г.): Доклады и краткие сообщения*. Нижневартовск: Изд-во НВГУ. С. 96—98.

Егоров И. Е., Глейзер И. В., Казаков А. Г. (2019). Особенности развития рельефа прибрежного мелководья Воткинского водохранилища. В сб.: *Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях: Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием, объединенной с XXXIV пленарным совещанием Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов* (г. Москва, МГУ имени М. В. Ломоносова, 3—6 сентября 2019 г.). М.: ЛЕНАНД. С. 197—198.

Маккавеев Н. И., Калинин А. М. (1969). Смещение крупных обломков и блоков пород в результате аблювиального эффекта. В сб.: *Экспериментальная геоморфология*. Вып. 2. М.: Изд-во МГУ. С. 107—112.

Мозжерин В. И., Курбанова С. Г., Куржанова А. А. (2002). О скорости пойменной дефлюкции в Среднем Поволжье. В сб.: *Сообщения семнадцатого пленарного Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов*. Краснодар: Краснодарский аграрный университет. С. 145—146.

Назаров Н. Н. (2007). Пространственно-временные особенности морфолитогенеза береговой зоны приплотинного участка Воткинского водохранилища. *Географический вестник*. № 1—2. С. 11—19.

Назаров Н. Н. (2008). Геодинамика побережий водохранилищ Пермского края. Пермь: ЗАО “Полиграфком-плект”. 152 с.

Панов Д. Г. (1966). Общая геоморфология. М.: Высшая школа. 426 с.

Поздняков А. В., Ройхвагер З. Б. (1980). Математическая модель развития склона при вязкопластическом смещении обломочного материала. *Геоморфология*. № 4. С. 54—60.

Стурман В. И., Егоров И. Е., Артемьева А. А. (2002). Комплексный геоэкологический подход к решению проблемы аварийности промысловых нефтепроводов. *Энергетика и нефтяная промышленность*. № 1. С. 67—74.

Тимофеев Д. А. (1978). Терминология денудации и склонов. М.: Наука. 243 с.

Auzert A. V. (1982)/ La mesure du creep: mise au point bibliographique. *Recherche Geographiques Strasbourg*. № 19—21b. P. 211—218.

Harris C. (1972). Processes of soil movement in turfbanked solifluction lobes, Okstindan, Northern Norway. *Polar Geomorphol. Symp. Aberdeen*. London, Inst. Brit. Geogr. P. 155—174.

Moeyersons J. (1989). A possible causal relationship between creep and sliding on Rwaza Hill, southern Rwanda. *Earth Surf. Processes Landforms*. V. 14. Iss. 6. P. 597—614. <https://doi.org/10.1002/esp.3290140615>

Swanston D. N. (1981). Creep and earthflow from undisturbed and management impacted slopes in the Coast and Cascade ranges of the Pacific northwest, U.S.A. In: *Erosion and sediment transport in Pacific Rim steeplands*. Davies T. R. H., Pearce A. J. (Eds.). Christchurch, New Zealand. I.A.H.S. Publ. 132. Washington, DC and Wallingford, United Kingdom: International Association of Hydrological Sciences. P. 76—94.

Tabor R.W. (1971). Origin of ridge-top depressions by largescale creep in the Olympic mountains, Washington.

Bull. Geol. Soc. Am. V. 82. № 7. P. 1811—1822. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1971\)82\[1811:OORDBL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1971)82[1811:OORDBL]2.0.CO;2)

UNDERWATER MASS MOVEMENTS ON SEASONALLY INUNDATED BANKS OF THE VOTKINSK RESERVOIR (KAMA RIVER, RUSSIA)¹

I. E. Egorov^{a, #}, I. V. Gleyzer^a, I. I. Grigorev^{a, ##}, and A. G. Kazakov^a

^a Udmurt State University, Izhevsk, Russia

[#] E-mail: egorov.i53@mail.ru

^{##} E-mail: ivangrig@yandex.ru

The paper presents a study conducted at a monitoring site near the village of Galyovo on the right bank of the Votkinsk reservoir. The research focuses on the processes of mass movement of fine and clastic material, including the destruction of rockfall slopes and the displacement of debris. The following methods and results were employed. Observations were conducted on the destruction of rockfall slopes, primarily composed of siltstones undercut by abrasion. The peculiarities of debris displacement were also noted. High-precision tacheometric surveying in non-reflective mode was used to determine the rates of slope failure. This method allowed for accurate measurements of slope movement. The rates of debris displacement were calculated by analyzing images obtained from drones and conducting topographic surveying. Mass measurements of the debris position were used to quantify the displacement rates. For the first time, the rates of slow mass movement of material delivered to the shoal due to bank destruction were determined and quantified. The main contribution to the volume of loose material entering the reservoir at the monitoring site was caused by weathering of high slopes. The rate of slope retreat was determined to be 14–15 cm/year, resulting in an input of colluvium of 6.6–7 m³ per linear meter per year. In the seasonally submerged areas of the shallow coastal zone, sediment transport was found to be related to various processes, including wave activity and mass movement of material in underwater conditions. The study recorded the displacement of sediments lining the shallow coastal zone before the formation of seasonal ice cover, with sliding distances of 15–20 meters by the beginning of spring water discharge. The movement of boulders was also observed, mainly in the range of 10–20 cm/year. It was noted that mass displacement of fine sediments in the summer was compensated by the input of products of crumbling, collapse, and bank abrasion. The data obtained from this study can be used to assess the role of various processes in the shallow water of the reservoir and calculate the rate of siltation of the reservoir. This information is valuable for understanding and managing the geomorphological dynamics of the coastal area and the reservoir.

Keywords: siltstones, shedding, collapsing, abrasion, lithodynamic flows

ACKNOWLEDGMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation, Project № 23-27-00194. <https://rscf.ru/project/23-27-00194>

REFERENCES

- Agafonov B. P. (1981). The process of freshly formed ledges retreat on slopes. *Geografiya i prirodnye resursy*. № 4. P. 37–45. (in Russ.)
- Agafonov B. P. (1986). On the nature of the slow displacement of loose cover. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geograficheskaya*. № 4. P. 55–64. (in Russ.)
- Agafonov B. P. (2005). Ascending lithoflows in the formation of lake shores (on the example of Baikal). In: *Novye i traditsionnye idei v geomorfologii. V Shchukinskiye chteniya*. Moscow: Geograficheskii fakul'tet MGU (Publ.). P. 197–199. (in Russ.)
- Auzert A. V. (1982). La mesure du creep: mise au point bibliographique. *Recherche Geographiques Strasbourg*. № 19–21b. P. 211–218.
- Azhigirov A. A., Golosov V. N. (1990). Slow mass movement assessment in engineering-geographical studies. *Geomorfologiya*. № 1. P. 33–40. (in Russ.)
- Berggaut V. V., Belousova N. I. (1985). Mass movement on slopes and soils. *Geomorfologiya*. № 1. P. 57–65. (in Russ.)
- Dedkov A. P., Duglav V. A. (1967). Slow movement of soil and soil masses on turfed slopes. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geograficheskaya*. № 4. P. 90–93. (in Russ.)
- Egorov I. E., Gleizer I. V., Kazakov A. G. (2018). Slow mass velocities displacement of soils in above-water and underwater conditions of the drainage basin. In: *Tridtsat' tret'e plenarnoe mezhdvuzovskoe koordinatsionnoe soveshchanie po probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov (g. Nizhnevar-*

¹ For citation: Egorov I. E., Gleyzer I. V., Grigorev I. I., Kazakov A. G. (2024). Underwater mass movements on seasonally inundated banks of the Votkinsk Reservoir (Kama River, Russia). *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 55. № 2. P. 126–137. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178924020067>; <https://elibrary.ru/PNVTRU>

- tovs, 2—4 oktyabrya 2018 g.): *Doklady i kratkie soobshcheniya*. Nizhnevartovsk: NVGU (Publ.). P. 96—98. (in Russ.)
- Egorov I. E., Gleizer I. V., Kazakov A. G. (2019). Features of the development of the relief of the coastal shallow waters of the Votkinsk Reservoir. In: *Zakonomernosti proyavleniya erozionnykh i ruslovykh protsessov v razlichnykh prirodnykh usloviyakh: Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, ob"edinennoi s XXXIV plenarnym soveshchaniem Mezhvuzovskogo nauchno-koordinatsionnogo soveta po probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov* (g. Moskva, MGU imeni M. V. Lomonosova, 3—6 sentyabrya 2019 g.). Moscow: LENAND (Publ.). P. 197—198. (in Russ.)
- Harris C. (1972). Processes of soil movement in turfbanked solifluction lobes, Okstindan, Northern Norway. *Polar Geomorphol. Symp. Aberdeen*. London, Inst. Brit. Geogr. P. 155—174.
- Makkaveev N. I., Kalinin A. M. (1969). Displacement of large fragments and rock blocks as a result of the abluvial effect. In: *Eksperimental'naya geomorfologiya*. Vyp. 2. Moscow: MGU (Publ.). P. 107—112. (in Russ.)
- Moeyersons J. (1989). A possible causal relationship between creep and sliding on Rwaza Hill, southern Rwanda. *Earth Surf. Processes Landforms*. V. 14. Iss. 6. P. 597—614. <https://doi.org/10.1002/esp.3290140615>
- Mozzherin V. I., Kurbanova S. G., Kurzhanova A. A. (2002). O skorosti poimennoi deflyuktsii v Srednem Povolzh'e. In: *Soobshcheniya semnadsatogo plenarnogo Mezhvuzovskogo nauchno-koordinatsionnogo soveta po probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov*. Krasnodar: Krasnodarskii agrarnyi universitet (Publ.). P. 145—146. (in Russ.)
- Nazarov N. N. (2007). Spatiotemporal features of the coastal zone morpholithogenesis of the dam section of the Votkinsk Reservoir. *Geograficheskii vestnik*. № 1—2. P. 11—19. (in Russ.)
- Nazarov N. N. (2008). Geodinamika poberezhii vodokhranilishch Permskogo kraya (Coasts geodynamics of reservoirs in the Perm Region). Perm': ZAO "Poligrafkomplekt" (Publ.). 152 p. (in Russ.)
- Panov D. G. (1966). *Obshchaya geomorfologiya* (General geomorphology). Moscow: Vysshaya shkola (Publ.). 426 p. (in Russ.)
- Pozdnyakov A. V., Rojhgager Z. B. (1980). Mathematical model of slope evolution due to viscous-plastic movement of debris mantle. *Geomorfologiya*. № 4. P. 54—60. (in Russ.)
- Sturman V. I., Egorov I. E., Artem'eva A. A. (2002). An integrated geo-ecological approach of solving the problem of accidents in oil field pipelines. *Energetika i neftyanaya promyshlennost'*. № 1. P. 67—74. (in Russ.)
- Swanston D. N. (1981). Creep and earthflow from undisturbed and management impacted slopes in the Coast and Cascade ranges of the Pacific northwest, U.S.A. In: *Erosion and sediment transport in Pacific Rim steeplands*. Davies T. R. H., Pearce A. J. (Eds.). Christchurch, New Zealand. I.A.H.S. Publ. 132. Washington, DC and Wallingford, United Kingdom: International Association of Hydrological Sciences. P. 76—94.
- Tabor R. W. (1971). Origin of ridge-top depressions by large-scale creep in the Olympic mountains, Washington. *Bull. Geol. Soc. Am.* V. 82. № 7. P. 1811—1822. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1971\)82\[1811:OORDBL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1971)82[1811:OORDBL]2.0.CO;2)
- Timofeev D. A. (1978). Terminologiya denudatsii i sklonov (Terminology of denudation and slopes). Moscow: Nauka (Publ.). 243 p. (in Russ.)
- Voskresensky S. S. (1971). *Dinamicheskaya geomorfologiya. Formirovanie sklonov* (Dynamic geomorphology. Slopes Genesis.). Moscow: MGU (Publ.). 229 p. (in Russ.)