



УДК [624.131.1+627.81](282.256.34)
DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.25.66>

Трансформация геологической среды в зоне влияния водохранилищ Ангарского каскада ГЭС

Е. А. Козырева, В. А. Бабичева, О. А. Мазаева

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

Аннотация. Создание водохранилищ Ангарского каскада ГЭС вызвало грандиозные техногенные преобразования геологической среды и привело к крупномасштабным изменениям ее компонентов и существенной перестройке всего комплекса условий и факторов. Индикаторами влияния технического объекта (водохранилища) на геологическую среду и источниками воздействия являются экзогенные геологические процессы, развивающиеся в зоне влияния водоема. В статье представлены результаты многолетних мониторинговых исследований режима и условий функционирования локальных береговых геосистем с комплексом экзогенных процессов, отражающих состояние природной среды и ее изменение в пространстве и во времени. Исследования показали, что береговая зона ангарских водохранилищ после длительного периода эксплуатации все еще не достигла стадии устойчивого равновесия. Сохраняется стабильная динамика абразионного процесса, особенно на береговых склонах, сложенных рыхлыми отложениями. Скорость смещения блочных оползней на мониторинговых участках увеличилась в разы: от 0,4–0,5 мм/год в естественных условиях до 1,7–3,0 см/год – в техногенных. Установлено, что трансформация береговой зоны усиливается в результате взаимодействия геологических процессов. Сформировались новые эолово-эрозионные, карстово-эрозионные, абразионно-эрозионные механизмы эрозионного процесса, нехарактерные для природных условий. Особую роль играет карстовый процесс. Составлены карты современной активности карстового процесса на территории юга Братского водохранилища за последний период эксплуатации (с 2000 г.). Выявлен всплеск карстовой активности в 2003, 2009 и 2011 гг., что тесно связано с периодами понижения уровня воды после периодов его высокого стояния. Представлена двухстадийная модель взаимодействия оползневых, эрозионных и абразионных процессов при высоком и низком уровнях в водоеме. Таким образом, область влияния Ангарского каскада водохранилищ характеризуется высокой динамичностью, определяемой эксплуатационными колебаниями уровня воды в водоемах, и до сих пор претерпевает трансформацию.

Ключевые слова: зона влияния водохранилища, оползни, абразия, карст, механизмы взаимодействия процессов, мониторинг.

Для цитирования: Козырева Е. А., Бабичева В. А., Мазаева О. А. Трансформация геологической среды в зоне влияния водохранилищ Ангарского каскада ГЭС // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2018. Т. 25. С. 66–87. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.25.66>

Введение

Каскад ангарских водохранилищ включает в себя искусственно созданные водные резервуары в долине р. Ангары и ее крупных притоков – Оки, Ии, Уды, Илима. Водоемы долинного типа протянулись с юга на север от

истока Ангары до места строительства плотины Богучанской ГЭС на расстояние более 850 км. Ширина водохранилищ на отдельных участках достигает 12–15 км, а протяженность берегов – более 8500 км. С момента наполнения первого ангарского водохранилища (Иркутского) прошло 56 лет, последний в каскаде резервуар (Богучанское водохранилище) заполнен до проектных отметок в 2015 г. С позиций геологического времени грандиозные техногенные преобразования геологической среды произошли одновременно, приведя к революционной перестройке всего комплекса условий и факторов, сопровождаемой крупномасштабными изменениями компонентов геологической среды.

В XX в. во многих странах мира были построены гидроэлектростанции и созданы водохранилища различного назначения и целей (гидроэнергетические, для водоснабжения, рекреационные). Они оказали большое антропогенное воздействие и вызвали значительные изменения в окружающей среде и землепользовании, а также различные природные опасности, такие как: наведенная сейсмичность [Aftershocks series monitoring ... , 2006; Gahalaut, Gahalaut, Pandey, 2007], оползни [Characteristics, mechanism and ... , 2006; Jian, Wang, Yin, 2009; Xia, Ren, Ma, 2013], карст [Milanović, 2011; A review on natural ... , 2014], эрозия, абразия и оползни [Collins, Sitar, 2008], абразия и эоловые процессы [Shoreline erosion and ... , 2010].

По опубликованным и фондовым материалам известно, что первый период наполнения и эксплуатации каждого из водохранилищ характеризовался значительными размывами берегов, отступанием бровки склона вглубь массива, формированием оползней, активизацией карста [Печеркин, 1969; Размывы берегов ангарских ... , 1971; Кусковский, 1974; Филиппов, 1988].

В связи с активным преобразованием природной среды наряду с комплексом природных факторов формирование и активизацию эрозионных форм все чаще стал определять техногенный фактор. Образование эрозионных форм на исследуемой территории при различных видах хозяйственной деятельности человека отмечалось многими исследователями [Бычков, 1964; Никифорова, Спесивцев, 1980; Рыжов, 1995]. В целом техногенный фактор оказывает существенное влияние на эрозию через нарушение условий поверхностного и подземного стоков, изменение морфологии склонов, ухудшение физических свойств почвы.

Создание Братского водохранилища оказало огромное воздействие на природные и экономические условия обширной территории. Из зоны затопления было перемещено до 240 сельских поселений, для восстановления сельскохозяйственных угодий освоено 90 тыс. га залесенных земель, построены новые автотранспортные магистрали и подъездные дороги к новым поселкам [Хисматуллин, 1991].

Также при заполнении водохранилища были затоплены пологие склоны, используемые в различных сельскохозяйственных целях. В соответствии с районированием побережья Братского водохранилища, проведенным до и после его заполнения, доля склонов до 10° уменьшилась с 91 до 78 %, и доля участков крутизной 10–15° возросла с 7 до 18 % [Тржцинский,

1994]. Это означает уменьшение доли склонов, пригодных для сельскохозяйственного производства. Освоение новых территорий сопровождалось вырубкой лесов, прокладкой дорог, распашкой склонов, расширением пахотных и пастбищных угодий и привело к широкому возникновению новых эрозионных форм. Дальнейшее нерациональное использование земель (перевыпас скота, орошение земель) усилило техногенную нагрузку на осваиваемые территории и стало причиной активизации уже существующих эрозионных форм и формирования новых. Временные дороги являются первичными ложбинами стока, а переорошение пахотных угодий вызывает развитие мелкоструйчатой эрозии, имеющей тенденцию в данных условиях к перерастанию в овражную, и в конечном счете приводит к расчленению пахотных угодий.

Практически все унаследованные оползни прореагировали на создание водоема увеличением смещений. В отдельных случаях важным фактором в образовании оползней послужила абразия. В результате многолетних наблюдений было отмечено, что активизация оползней происходит с различной степенью интенсивности и часто определяется уровнем режимом водохранилища. Последующие исследования динамики оползней на Братском водохранилище показали, что в периоды, характеризующиеся низкими уровнями воды в водохранилище, происходит снижение оползневой деятельности. Ю. Б. Трзцинский [Trzhtsinskii, 1978] считал главной причиной образования новых и активизации старых оползней на водохранилищах Ангарского каскада ГЭС снижение прочности глинистых пород при обводнении.

Но существует другая точка зрения. Так, например, исследования старейшего оползня на одном из водохранилищ Китая [Characteristics, mechanism and ... , 2006] показали, что он активизировался после наполнения водоема и оползневые деформации тесно связаны с колебаниями уровня воды. Однако последующие наблюдения выявили, что деформации более тесно связаны с понижением уровня водохранилища, чем с его повышением.

Возможно, в этих гипотезах нет противоречия. Различные выводы могут быть обусловлены морфометрическими и морфологическими особенностями водохранилищ, геолого-структурными особенностями участков, различным положением зоны скольжения относительно уровня воды в водоеме, что требует комплексного изучения объектов.

С момента ввода в эксплуатацию водохранилищ произошла глубокая перестройка гидрогеологических условий на прилегающих территориях [Пиннекер, Вологодский, 1962]. Обводнение интенсивно трещиноватой зоны выветривания и закарстованных пород бывшей зоны аэрации вызвало расширение зоны с тесной взаимосвязью поверхностных и подземных вод.

Было установлено, что уровень подземных вод с различной степенью запаздывания повторяет изменения уровня водохранилищ и ширина зоны влияния и высота подпора подземных вод изменяются в значительном диапазоне [Шенькман, 1993; Овчинников, Павлов, Трзцинский, 1999].

В пределах городской территории зона влияния Иркутского водохранилища определяется на расстоянии от 0,2 до 0,4 км, в приплотинной части правобережья водохранилища может достигать 2–3 км, периодически формируя подтопление фундаментов зданий коттеджных поселков.

Для Братского водохранилища наименьшие величины (0,3–0,5 км) отмечаются в слабопроницаемых глинистых породах. Наибольшая ширина зоны влияния водохранилища достигает 25 км в сульфатно-карбонатных отложениях.

Для Усть-Илимского водохранилища, многолетняя сработка уровня которого может достигать 3 м, ширина зоны влияния в большей части локализована в узкой прибрежной полосе, что объясняется слабой проницаемостью распространенных в береговой зоне пород. Наибольшая величина зоны влияния (до 4–6 км) возможна на участках, сложенных загипсованными породами терригенно-карбонатных и терригенных формаций ордовика, карбона.

Созданные водохранилища имеют ряд особенностей, объединяющих их в единую группу и отличающих от других водохранилищ европейской части России и ряда стран мира. Очертания водоемов имеют сложную конфигурацию береговой линии с чередованием сужений и озеровидных расширений. Унаследованная эрозионная расчлененность поверхности Сибирской платформы долинами крупных рек и их многочисленных притоков предопределила сильную изрезанность береговой линии водохранилищ. Коэффициент извилистости береговой линии на водохранилищах достигает 5,5 [Размывы берегов ангарских ... , 1971]. Наряду с высокой расчлененностью рельефа для морфологии склонов долин характерен глубокий эрозионный врез рек, что отразилось на распространении высоких и преимущественно крутых береговых склонов. Среди этой группы выделяется крупное равнинное водохранилище – Братское, с сезонными колебаниями уровня воды, достигающими 3–4 м, и многолетними до 10 м, что делает его моделью для исследования изменений геологической среды и ее компонентов в зоне влияния крупных технических объектов.

Материалы и методы

Обводнение прилегающих массивов при наполнении водохранилищ вызвало глобальную перестройку компонентов геологической среды и изменение их состояния и свойств, формируя зону воздействия технического объекта на геологическую среду – зону влияния. Определение положения внешней границы зоны влияния водохранилищ – трудная задача в связи со сложностью геолого-геоморфологических условий территории, их многофакторностью и изменчивостью как по площади, так и в разрезе, а также в связи с режимом эксплуатации самого технического объекта.

Зона влияния технического объекта – пространственный объем массива горных пород, в пределах которого под влиянием природно-техногенных факторов происходят изменения всех или отдельных компонентов геологической среды. Ширина зоны влияния водохранилищ (по площади воздействия) устанавливается с учетом изменений гидрогеологических параметров горных пород по профилю и разрезу, особенностей распространения подпора подземных вод, техногенной активизации экзогенных геологических процессов (ЭГП) и зависит от сезонного колебания уровня воды в водоеме.

Индикаторами влияния технического объекта (водохранилища) на геологическую среду являются ЭГП, развивающиеся в зоне его влияния. Поэтому для изучения трансформации геологической среды под воздействием техногенных факторов, связанных с созданием и особенностями эксплуатации водохранилища, были выполнены мониторинговые исследования режима и условий функционирования локальных береговых геосистем.

Береговые локальные геосистемы ограничены участками береговой зоны и находятся в зоне влияния подпора водоема. По представлению авторов, береговые локальные геосистемы – это участки побережий с развивающимся в их пределах комплексом парагенетически связанных ЭГП, отражающих состояние системы и ее изменение во времени и пространстве.

Для Ангарского каскада ГЭС лабораторией инженерной геологии и геоэкологии Института земной коры СО РАН была создана система геодинамических полигонов и стационаров, расположенных в различных ландшафтных условиях. Систематические ежегодные наблюдения за отдельными видами ЭГП проводились на 77 участках, на 43 из них изучалась абразия, на 15 – гравитационные процессы, на 11 – карстово-суффозионные и на 8 – эрозионные. Применялись инструментальные съемки по наблюдательным створам, наблюдения за выносом (масса и состав) по системе учетных площадок и наносоуловителей в днище оврагов, измерения линейных и вертикальных приращений. Результаты этих исследований были использованы нами для сравнительного анализа динамики развития ЭГП.

В 2000 г. на базе существующих региональных методик и ранее полученных результатов исследований авторами была разработана методика комплексной оценки развития локальных геосистем для Братского водохранилища.

Разработанная методика предполагает:

- 1) выбор ключевого участка на основе анализа условий и факторов развития процессов до и после создания водоема, а также дешифрирования аэрофотоснимков;
- 2) мониторинговые исследования с разбивкой сети наблюдений и проведением топографо-геодезической съемки;
- 3) построение объемных картографических моделей, их сравнительный анализ, выявление качественных и количественных взаимосвязей в геосистеме;
- 4) обновление и составление карт современной активности процессов.

С 2006 г. с целью исследования комплекса абразионных, эрозионных и эоловых процессов были организованы два ключевых участка (на правом берегу Братского водохранилища). Для мониторинга и построения цифровых моделей был применен метод повторных GPS-съемок в кинематическом режиме. Фиксировались отступление бровки берегового уступа, морфометрические характеристики эрозионных форм, развивающихся от бровки, границы площадного распространения активных эоловых полей на поверхности берегового склона.

Динамика оврагов на участке Рассвет оценивалась по изменению их объема за период между измерениями с частотой 1 раз в год. Детальная морфометрическая съемка оврагов выполнялась с помощью лазерного дальномера Leica disto A8.

Дополнительно для получения данных по среднесрочной динамике эоловых полей на участке Рассвет и эрозионных форм на участке Улей был применен сравнительный анализ разновременных снимков 1969 (масштаб 1:7200), 1971 (масштаб 1:6500) и 1980 гг. (масштаб 1:10 000).

Целью мониторинговых исследований является изучение режима и условий функционирования локальных береговых геосистем и их изменения под воздействием природных и техногенных факторов, связанных с созданием и режимом эксплуатации водохранилища.

Результаты

В исследовании детально рассматриваются оползневые, абразионные, эрозионные, эоловые, карстовые процессы, которые проявили активную динамику после создания ангарских водохранилищ.

Оползни

Оползни встречаются на берегах водохранилищ всего каскада. Большинство оползней на берегах ангарских водохранилищ по генезису являются оползнями выдавливания блочного типа [Тржцинский, 1994].

Важным и необходимым условием возникновения и развития таких оползней является двухслойное строение склонов, при котором глинистые отложения, предрасположенные к пластическим деформациям, всегда залегают стратиграфически ниже непластичных жестких пород. Жесткий кроющий массив играет роль инертной давящей массы, а глинистые породы являются активной частью оползня. В последних, по мере постепенного разуплотнения и разупрочнения в результате воздействия вод водохранилища, возникают объемные деформации, проявляющиеся сначала в виде медленных пластических течений, а завершающиеся в стадии сдвига с относительно быстрыми скоростями смещений.

В пределах Иркутского и Братского водохранилищ оползневые деформации распространены на площади от 0,8 до 0,95 км². Многие крупные оползни в юрских песчаниках на Иркутском водохранилище оказались затоплены. Большинство унаследованных оползневых участков расположено на берегах Братского водохранилища. Унаследованные оползневые участки, сформированные в конце плейстоцена при образовании среднего комплекса террас р. Ангары, возобновили активность после наполнения водохранилища. Например, Ново-Октябрьский унаследованный оползень (Окинская акватория) остался в стадии глубинной ползучести. На этом участке средняя скорость смещений составляет 7,17 мм/год, средняя скорость отступления бровки берегового уступа на протяжении всего участка – 22,7 см/год.

По периметру береговой линии Братского водохранилища максимальная пораженность оползневыми деформациями характерна для Окинской акватории, где деформации связаны с особенностями литологии терригенных отложений ийской свиты ордовика, а также для Ангарской акватории в гипс-ангидритовых породах кембрия и глинистых разностях ордовика.

По замерам, выполненным Ю. Б. Тржцинским в 1960-е гг., средняя скорость движения на оползнях глубинной ползучести в естественных усло-

виях составляла 0,4–0,5 мм/год (период до заполнения водохранилища). Динамика смещений на участках развития унаследованных блочных оползней в условиях эксплуатации водохранилища усилилась в разы. Скорость смещения Монастырского оползня в коренных породах в период с 1977 по 1995 г. составила 1,7–3,0 см/год, что говорит о стабильном движении оползневого склона. Блочные оползни выдавливания сохраняют такие небольшие скорости, которые не превышают нескольких сантиметров в год, но при этом их активизация носит «вековой» характер. Причинами развития подобных, медленных смещений зачастую служат процессы дезинтеграции и изменения физико-механических свойств горных пород основания массива.

Все оползневые участки южной части Братского водохранилища испытывают последствия процессов карстового выщелачивания. В районе залива Шалоты расположено сразу несколько унаследованных оползневых участков. Зоной смещения этих оползней является слой выщелоченных сульфатно-карбонатных пород, залегающих на отметке современного нормального подпорного горизонта водохранилища. При высоких уровнях воды в водохранилище происходит размыв сформировавшихся делювиальных отложений, и подножье склона обнажается, отступая вглубь до 3 м. По трещиноватым зонам на склоне происходит общее проседание дневной поверхности до 15 см в год. Зафиксировано проявление ряда провалов шахтного типа, по всей видимости, заложение границы нового оползневого блока. Нарушен дерновый покров, провалы на поверхности достигают размеров 40×40 см, со значительной глубиной более 3 м (рис. 1).

Смещение таких оползней, как Балаганский, Барсунский, Имбейский, происходит по наклонной или круглоцилиндрической поверхности скольжения, которая формируется в зоне разупрочненных глинистых пород (аргиллитов и алевролитов).

На современном этапе эксплуатации на берегах ангарских водохранилищ сохраняется значительная динамика в развитии оползневых деформаций.

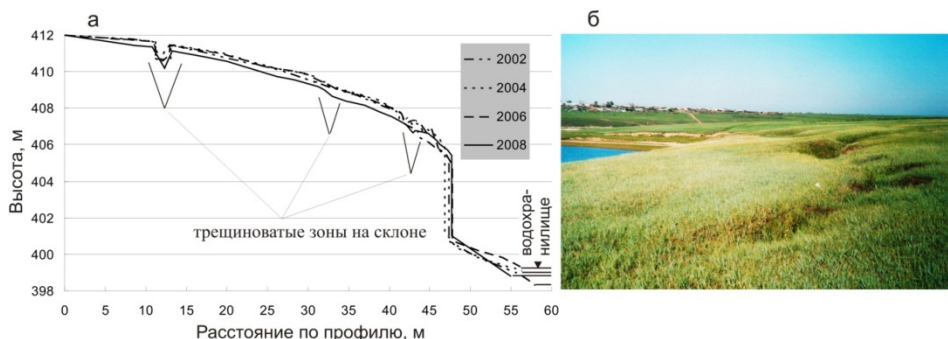


Рис. 1. Оползневый склон в заливе Шалоты: а) геодезический профиль 2002–2008 гг.; б) серия провалов по трещиноватой зоне

Абразия

Абразионный процесс в формировании береговых склонов ангарских водохранилищ на современном этапе эксплуатации сохраняет доминирующую роль.

Абразионные берега Иркутского водохранилища с максимальными размывами сложены преимущественно суглинками и супесями – пылеватыми, макропористыми, карбонатными, в приповерхностном слое лессовидными. Грунты, слагающие участки берега с максимальными размывами, по своим физико-механическим свойствам характеризуются просадочностью и снижением устойчивости к внешним дополнительным нагрузкам.

В результате научно-исследовательских работ на берегах Иркутского водохранилища выявлена динамика береговой линии за период эксплуатации (1961–2015 гг.). Ширина размыва на стационарных участках: Патроны – 100 м, Грудинино – 180 м, Новоразводная – 200 м.

Даже близкие по геологическому строению берега ключевых участков значительно отличаются друг от друга внутригодовой активностью абразионного процесса, которая зависит от литологии грунтов и ветроволновых нагрузок. Максимальной трансформации подвержены мысовые участки, сложенные четвертичными отложениями (суглинки и супеси). Береговая линия заливов осталась в прежних пределах, фактически не изменив своего положения за почти 60-летний период эксплуатации. Мысовые участки испытывают значительные размывы до 3 м/год (Грудинино – 2,5, Новоразводная – 3,5 м/год).

Полученные результаты по абразии берегов согласуются с долгосрочным прогнозом переработки за 25-летний период эксплуатации, сделанным Г. И. Овчинниковым в 90-х гг. прошлого века [Овчинников, Павлов, Тржцинский, 1999]. Максимальные размывы (до 100 м) прогнозировались для участков, выполненных рыхлыми отложениями основной акватории правого берега водоема.

Протяженность берегов Братского водохранилища составляет 6030 км, около 38 % сложено рыхлыми четвертичными отложениями. Абразионные берега составляют 2056 км (34,2 % общей протяженности берегов) [Овчинников, 2003]. Максимальная ширина размыва характерна для склонов, сложенных рыхлыми образованиями (пески, лессовидные супеси и суглинки), минимальная – для скальных и полускальных грунтов (песчаники, доломиты, известняки, алевролиты, аргиллиты, мергели) (рис. 2).

При формировании локальных участков побережья происходит активное взаимодействие процесса абразии с различными ЭГП, что определяет формирование разнообразных механизмов трансформации берега и генетических подтипов берегов: абразионно-осыпных, абразионно-обвальных, абразионно-оползневых, абразионно-карстовых и др.

Для мониторинга абразионного размыва по результатам GPS-съемки в кинематическом режиме были построены цифровые модели рельефа. Исследования выполнялись на двух участках, береговые уступы которых сложены песками, лессовидными супесями и суглинками.

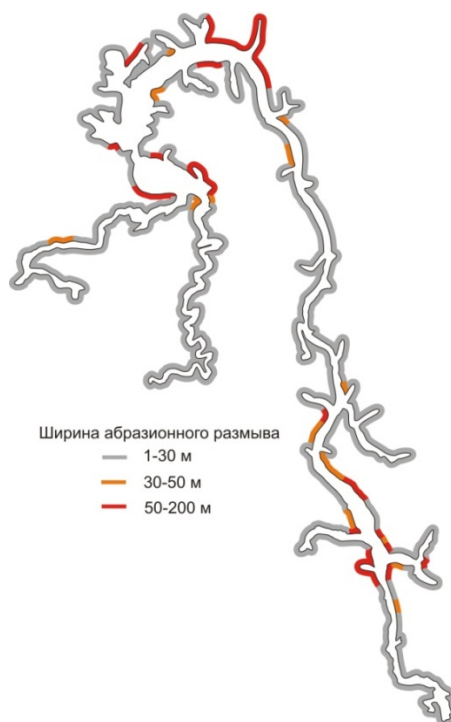


Рис. 2. Карта типизации берегов Братского водохранилища по ширине абразионной переработки

Сравнительный анализ моделей 2006 и 2007 гг. показал, что ширина отступления бровки берегового склона на участке Рассвет варьируется от 0 до 8 м за год. Максимальные значения отмечаются в западной части участка, расположенной ближе к основной акватории водохранилища, минимальные – в восточной части, примыкающей к малому заливу. Общий объем грунтового материала, потерянного при отступании бровки берега за год (включая эрозионный размыв), составляет 13 860 м³. По данным Г. И. Овчинникова, ширина размыва на данном участке за период 1967–1996 гг. составила 40–95 м, максимум – до 130 м [Овчинников, 2003], что в среднем составляет 1,4–3,3 м/год, максимум – 4,5 м/год.

Участок Закорюково характеризуется меньшими величинами отступления бровки берега и объемами размываемого грунта до 2690 м³ за год. Основную роль здесь играют эрозионные процессы, в отличие от участка Рассвет, где наибольшая часть материала потеряна за счет абразионного процесса.

Овражная эрозия

Развитие овражной эрозии на берегах созданного Братского водохранилища стало определяться следующими факторами. Несмотря на повышение базиса эрозии, произошел рост старых и образование новых форм. Устьевые части оврагов, развивающихся на террасах и придолинных склонах, были затоплены, что искусственным образом снижало пораженность этим процессом. Однако нарушение продольного профиля равновесия овра-

гов способствовало их активизации. В пределах береговых отмелей в результате физического выветривания и морозобойного растрескивания сформировались специфические условия для эрозионного размыва талыми водами [Лешиков, Спесивцев, 1984].

На участках абразионных берегов механизм развития эрозионных форм зависит от уровня стояния воды в водохранилище. Развитие эрозионных форм на берегах Братского водохранилища в условиях внутригодового и многолетнего колебания уровня полностью укладывается в схему, предложенную И. А. Печеркиным [Печеркин, 1969] для камских водохранилищ.

Создание водохранилища привело к формированию новых (эолово-эрозионных, карстово-эрозионных, абразионно-эрозионных) механизмов развития эрозионного процесса, нехарактерных для природных условий на данной территории [Impact of large ... , 2016].

На абразионно-осыпном береговом склоне участка Улей (залив Оса) наблюдается развитие 31 эрозионной формы протяженностью 65–200 м. До заполнения водохранилища они развивались на коротких речных береговых склонах и находились в неактивном состоянии. Определяющим фактором активизации эрозии явились колебания уровня воды в водохранилище. При высоких уровнях устьевые части оврагов были затоплены. Активно развивающийся процесс абразии вызвал смещение бровки береговых уступов, увеличение их высоты, подвешивание устьев оврагов и, в конечном счете, нарушение продольного профиля равновесия, уменьшение протяженности оврагов. Формирование волноприбойных ниш и обрушение блоков над ними вызвало возникновение уступов регрессивной эрозии. При снижении уровня под воздействием природных процессообразующих факторов происходит активизация регрессивной эрозии на этих участках.

На участке Рассвет, где наполнение водохранилища инициировало развитие эоловых процессов, выявлен эолово-эрозионный механизм. На участке Хадахан при активизации карста после высоких уровней в 2004 г. произошло слияние двух оврагов по карстово-эрозионному механизму, в результате чего их суммарный объем увеличился в 2,4 раза.

На ключевом участке Быково, расположенном на левобережье Братского водохранилища, наблюдались абразионно-оползневый, эрозионно-оползневый, суффозионно-эрозионный механизмы взаимодействия [Mazaeva, Khak, Kozyreva, 2013]. Это оползневый склон протяженностью 250–300 м, осложненный эрозионными и абразионными процессами. Зона пляжа и абразионный уступ сложен доломитами, известняками, гипсами, ангидритами и карбонатными брекчиями. В отдельных частях изучаемого участка эрозией обнажены переслаивающиеся мергели и доломиты с редкими прослоями аргиллитов и алевролитов, маломощными пропластками и линзами гипса. В нижней части свита содержит глины с брекчиями красной и зеленой окраски. Оползневый процесс развивается в среднечетвертичных грунтах (aQ_{II}) фрагмента эрозионно-аккумулятивной террасы, представленной песком, песком с галькой, супесями и суглинками. Наполнение водоема привело к колебанию уровня подземных вод, дополнительному переувлаж-

нению песков, обводнению суглинков и глин, что вызвало оползневые сдвиги и сплывы.

На основе анализа факторов, среды и динамики геологических процессов составлена модель их взаимодействия на локальном участке берега при смене положений отметок уровня воды в водоеме.

Стадия 1

При высоких уровнях водохранилища происходит абразионная подрезка береговых уступов, формирование волноприбойных ниш и снижение устойчивости крутых оползневых склонов. Дополнительное увлажнение грунтов под воздействием как климатического фактора (обильные осадки), так и гидродинамического (повышение уровня грунтовых вод вслед за повышением уровня воды в водоеме), приводит к их разупрочнению, снижению прочности. Это провоцирует активизацию оползневых процессов и усиление их динамики.

Оползневые деформации вызывают значительные изменения морфологии берегового склона. Формирование оползневых сплывов и оползней-потоков на бортах оврагов приводит к увеличению их ширины и уменьшению глубины, перекрытию устьевых частей отдельных эрозионных форм.

Стадия 2

При низких уровнях отмечается активизация эрозионных процессов при стабилизации оползневых деформаций склона. После абразионной подрезки берегового склона с находящимися в его пределах устьевыми частями оврагов происходит нарушение профиля продольного равновесия оврагов и активизация глубинной эрозии. Возрастает энергия эрозионного потока, прорезающего береговой уступ, в результате чего на отмель выносятся большое количество грунтового материала, формирующего конусы выноса. При постепенно понижающемся уровне воды на отмели образуются вторичные абразионные уступы, которые, так же как и конусы выноса, прорезаются эрозионными промоинами.

Снижение уровня воды в водохранилище, а вслед за ним и уровня грунтовых вод приводит к усилению фильтрационных потоков в береговом массиве и закономерной активизации суффозионно-просадочных процессов, что также способствует вершинному росту эрозионных форм.

Эоловые процессы

В результате создания Братского водохранилища и формирования новой береговой линии в пределах побережья возникли современные песчаные массивы – формы проявления эолового процесса.

В крупных масштабах развитие эоловых процессов отмечается на осушенных отмелях, сформированных мелко- и среднезернистыми песчаными наносами, в результате размыва террас в верховьях долин Ангары, Оки и Ии, сложенных супесчаными и песчаными отложениями, а также при размыве древних эоловых образований, приуроченных к расширенным участкам речных долин. В меньшей степени эоловые процессы развиваются на отмелях, формирующихся при размыве песчаников среднемамырской подсвиты ордовика и сложенных средне- и крупнозернистыми песчаными

наносами. Наиболее обширные поля эоловых отложений отмечаются в Долоновском и Калтукском расширениях по Окинскому заливу, в верховьях Ангарского, Окинского и Ийского плесов, на левобережье Заярского расширения по Ангарской акватории [Овчинников, Павлов, Грждинский, 1999].

Под действием ветров северо-западного и западного направлений по правобережью южной части Братского водохранилища формируются вдольбереговые песчаные массивы в виде приоткосных эоловых образований у подножий абразионных уступов, плащеобразных покровов и гряд выше бровки уступов на поверхности незалесенных береговых склонов, а также дюн, локализованных в пределах лесных массивов. Дюны, формируемые за счет выеваемого песка, невысокие – 1,5–3,0 м, с асимметричными склонами. За дюнами, на залесенном склоне, на расстоянии 20–30 м происходит аккумуляция эоловых песков в виде покровов мощностью не более 5 см. На старых эоловых отложениях, покрытых травянистой растительностью, недалеко от бровки берегового склона, формируется так называемый изъеденный рельеф – небольшие отрицательные формы рельефа, способствующие концентрации стока талых вод и последующему разрушению береговых уступов. Выдув песка создает западины площадью 15–25 м², а бугры, закрепленные растительностью, остаются. В береговых уступах повсеместно наблюдаются трещины бокового отпора, заполненные эоловым песком, отсевшие блоки породы.

Высокая интенсивность развития эоловых процессов в береговой зоне Братского водохранилища определяется прежде всего амплитудой колебания уровня воды. Немаловажное значение на этом фоне приобретают активно развивающиеся в пределах берегов водохранилища абразионно-аккумулятивные процессы, обеспечивающие постоянный приток песчаного материала в береговую зону. Характер развития эолового процесса – циклический и связан с продолжительностью стояния уровня воды на низких отметках. В зависимости от амплитуды колебания уровня воды изменяется ширина осушенной части отмели. Так, например, при максимальных отметках уровня воды (401,5 м) ширина осушенной отмели на одном из участков активного развития эоловых процессов составляет 5–20 м, а площадь отмели, подверженная воздействию ветров западного, северо-западного и юго-западного направлений, – 6,5; 6,0 и 7,0 га соответственно. При минимальных отметках уровня (391,5 м) ширина отмели с учетом ее морфологических особенностей на данном участке увеличивается до 260–620 м, а площади – до 31, 27 и 38 га соответственно.

На основе изучения шести разрезов эоловых отложений в пределах дюнных образований, расположенных на залесенных участках береговых склонов, выявлены некоторые закономерности осадконакопления. Эоловые отложения разрезов были представлены песком различной крупности (мелко- и среднезернистый) и окраски, некоторые характеризовались слоистостью. Восстановить ход эоловых процессов от начала формирования дюн, выделить этапы осадконакопления и определить скорости накопления песчаных наносов удалось по обнаруженным в разрезах погребенным гумусо-

вым горизонтам. Их формирование, вероятнее всего, приурочено к периодам высокого уровня воды в водохранилище, когда подстилающие породы и, соответственно, почва были хорошо увлажнены, растительность развивалась более бурно и формировала осенью мощный слой опавших листьев. Прослой песка между гумусовыми горизонтами формировались в периоды низкого уровня воды в водохранилище (рис. 3).

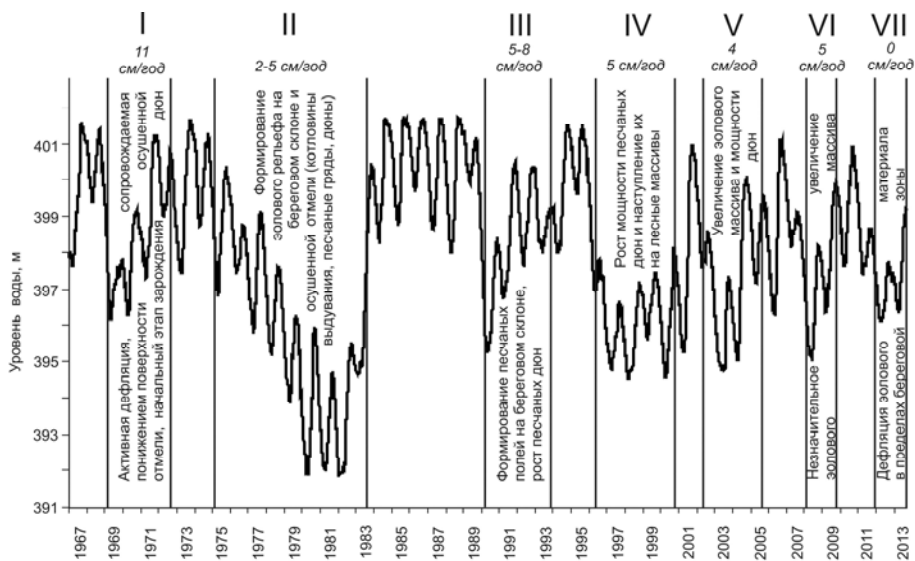


Рис. 3. Этапы развития (I–VII) золотого процесса в береговой зоне Братского водохранилища и средняя скорость аккумуляции песка относительно уровня воды в водохранилище

Карст

Развитие карста обусловлено наличием карбонатных и сульфатных пород кембрия (доломиты, известняки, карбонатные брекчии, ангидриты, гипсы), терригенно-карбонатных пород ордовика (доломиты, известняки, известковистые и доломитовые песчаники), карбонатных пород протерозоя (мраморы, мраморизованные известняки) и циркулирующих в них трещинно-пластовых и трещинно-карстовых вод [Trzcinski, 1996]. Наиболее изученными являются районы развития карста на юге Братского водохранилища. По составу пород в зоне влияния выделен карбонатный и сульфатно-карбонатный карст, последний характеризуется наибольшей интенсивностью проявления и современной активностью [Kozyreva, Trzhtsinsky, 2004]. На основе структурно-геологических особенностей и положения в разрезе карстующихся пород выделены следующие типы карста: бронированный, покрытый и открытый.

Современная активизация карста связана с созданием Братского водохранилища, формированием подпора и колебаниями уровня поверхностных и подземных вод. В береговой зоне шириной до 700 м сформировалось до 200 провалов диаметром от 2 до 10 м [Овчинников, Павлов, Тржцинский,

1999]. Ширина зоны влияния водохранилища в районе Унгино-Осинского расширения в зависимости от геологических и гидрогеологических условий изменяется от нескольких сотен метров до 5–6 км.

Формы карста представлены коррозивно-суффозионно-провальными и суффозионно-провальными воронками, суходолами, карстовыми и карстово-оползневыми рвами. Известен ряд пещер, среди которых наиболее крупная – Балаганская. Наибольшей активностью и интенсивностью карсто-суффозионных процессов и их техногенной активизацией характеризуются Хадаханско-Мельхитуйский и Рассвет-Усть-Алтанский массивы. По результатам ежегодных мониторинговых работ и обследования этих ключевых участков составлены карты-схемы активности карстового процесса (рис. 4). В мысовой части залива Шалоты и у поселка Хадахан начиная с 2000 г. фиксируется общее проседание отдельных участков территории, формирование трещинных зон, заколов с разрывом дерна (см. рис. 1, б). Отмечены свежие провалы, воронки, вскрытие полых трещинных зон с карстовыми лабиринтами. Ежегодно наблюдаются обновление бортов унаследованных карстовых воронок, просадки днища карстовых форм, расположенных на выровненной поверхности с абсолютными отметками от 400–480 м на Хадаханско-Мельхитуйском карстовом массиве. В береговой зоне с абсолютными отметками поверхности до 400 м ежегодно происходит вскрытие по унаследованным трещиноватым зонам свежих карстовых форм – карстовые эфемерные пещеры, гроты. С 2000 г. на дневной поверхности не фиксируется «залечивание» карстовых форм.

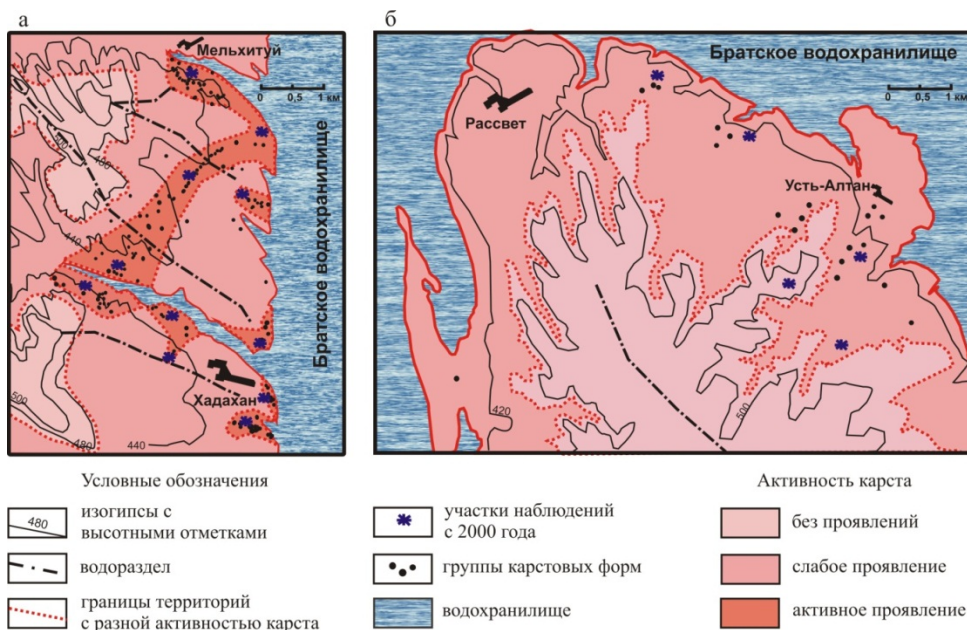


Рис. 4. Активность карстового процесса Хадаханско-Мельхитуйского (а) и Рассвет-Усть-Алтанского (б) массивов

Выделены три зоны активности проявления карстового процесса на юге Братского водохранилища.

1-я зона. Территории с активным проявлением карстового процесса на дневной поверхности – участки распространения карста открытого типа, где за последние 15 лет произошло обновление карстовых форм на дневной поверхности и зафиксированы свежие карстовые полости, провалы, гроты, эфемерные пещеры. Карстовый процесс активно влияет на преобразование рельефа, провоцирует развитие сопутствующих экзогенных процессов. Карстовые формы имеют коррозионно-гравитационный, карстово-эрозионный и абразионно-карстовый генезис. В первом случае вскрываются полости в виде одиночных провалов глубиной до 20 м и проявляются карстово-оползневые деформации, во втором – серия карстовых воронок, соединяясь, образует крупные эрозионные формы.

2-я зона. Территории слабого проявления карстового процесса на дневной поверхности – участки территории, расположенные в пределах покрытого морфогенетического типа карста со слабой активизацией карстовых проявлений на дневной поверхности. Несмотря на это, сохраняется высокая вероятность проявления деформаций на земной поверхности по трещиноватым зонам и возможность образования провалов, гротов, просадок грунта и других деформаций.

3-я зона. Территории без проявления карстовых форм на дневной поверхности – это участки распространения карста бронированного типа. О развитии карстового процесса в массиве свидетельствуют инструментальные геолого-геофизические исследования. Карстовые деформации на земной поверхности не наблюдаются, за исключением участков с техногенным нарушением целостности перекрывающих отложений.

Обновление карстовых форм и проявлений других процессов на дневной поверхности ежегодно фиксируется и картируется. В 2003 г. было отмечено вскрытие свежих карстовых форм.

Проведенные экспедиционные работы 2009 г. в районе Хадаханско-Мельхитуйского карстового массива выявили всплеск активности карстового процесса. Произошло обновление существующих карстовых форм, расширение трещин бортового отпора, просадки территории, формирование новых единичных провалов.

В заливе Мухор-Желга на расстоянии около 300 м от устья в гипсоносных породах вскрылись две системы полостей, перпендикулярных береговой линии: на урезе воды и выше по склону. Полости представляют собой ходы щелеобразной формы: первая – шириной до 1,5 м, высотой до 5 м, длиной до 8 м; вторая – шириной до 0,5 м, высотой до 5,6 м. Основным заполнителем пещер является жидкая глина и лед. Вмещающая порода – гипс слоистой структуры от белого до темно-серого цвета. Свежие карстовые воронки в районе покрытого карста в срединной части залива глубиной до 4 м вскрыли вход в пещеру, уходящую вглубь склона на 17 м. Морфология и ориентация этих форм определяются тектонической трещиноватостью вмещающих пород юго-восточного и северо-восточного простирания.

В 2011 г. в зонах распространения карста открытого типа (в доломитах литвинцевской свиты среднего кембрия) и карста покрытого типа был зафиксирован очередной всплеск проявления карстовых форм на дневной поверхности. Отмечались свежие провалы, разрывы дерна, трещины, соединение отдельных форм, просадки.

В результате мониторинга было установлено, что динамика современного карста отличается от динамики начального периода наполнения и первого этапа эксплуатации постоянной активизацией с небольшой интенсивностью. Она выражается в приращении свежих форм, проявлении деформаций на дневной поверхности, наличии ежегодных обновлений.

Периоды активизации карстовых форм на дневной поверхности связаны с циклами снижения уровня воды, следующими за этапами высоких положений и длительного стояния уровня воды на высоких отметках. Обводнение массивов горных пород при высоких отметках уровня воды в водоеме способствует проникновению пресных вод в массив горных пород, выщелачиванию и развитию карста. Всплеск карстопоявления и обновление форм на дневной поверхности отмечен в 2003, 2009 и 2011 гг.

Заключение

Эксплуатационный режим технического объекта и положение уровня воды в водохранилище – очень важные факторы при оценке эволюционных преобразований геологической среды, современного инженерно-геологического состояния территорий, прилегающих к водохранилищам.

Зона влияния Ангарского каскада водохранилищ характеризуется высокой динамичностью, взаимосвязью с эксплуатационными колебаниями воды в водоемах и до сих пор претерпевает трансформацию, индикаторами которой являются ЭГП.

Трансформация береговой зоны усиливается в результате взаимодействия процессов. Составлена двухстадийная модель взаимодействия экзогенных процессов в пределах берегового участка Быково при различном положении уровня воды. Модель отражает развитие оползневых, эрозионных и абразионных процессов при высоком и низком уровне в водоеме.

Братское водохранилище – крупное равнинное водохранилище с сезонными колебаниями уровня воды, достигающими 3–4 м, и многолетними – 10 м, что делает его моделью для исследования изменений геологической среды и ее компонентов в зоне влияния крупных технических объектов.

Мониторинговые исследования абразионного процесса выявили, что береговая зона Братского водохранилища после 51 года эксплуатации все еще не достигла стадии устойчивого равновесия, характеризуется стабильной динамикой абразионного процесса, особенно на береговых склонах, сложенных рыхлыми отложениями. На карте выделены участки берега с различной шириной абразионного размыва. Сравнительный анализ цифровых моделей рельефа участка Рассвет показал, что ширина отступления бровки берегового склона составляет от 0 до 8 м за год, что не говорит о затухании процесса. Максимальные размывы берега Иркутского водохрани-

лица отмечаются по правобережью водоема, где формирование береговой зоны происходит в лессовидных супесях и суглинках.

Создание водохранилища привело к формированию новых (эолово-эрозионных, карстово-эрозионных, абразионно-эрозионных) механизмов развития эрозионного процесса на данной территории.

На берегах водохранилищ отмечена активизация унаследованных оползней и возникновение свежих оползневых деформаций в виде сдвига по наклонной или круглоцилиндрической поверхности скольжения. За период эксплуатации водохранилища скорость смещения блочных оползней на мониторинговых участках увеличилась в разы: от 0,4–0,5 мм/год в естественных условиях до 1,7–3,0 см/год – в природно-техногенных (после создания водохранилищ). Активизация оползневых смещений происходит после периодов высокого положения уровня воды в водохранилище, а при низком положении уровня снижается и активность оползней.

Составлены карты современной активности карстового процесса на территории юга Братского водохранилища за последний период эксплуатации (с 2000 г.). Выявлен всплеск карстовой активности в 2003, 2009 и 2011 гг., что тесно связано с периодами понижения воды после циклов высокого стояния уровня водохранилища.

Таким образом, режим эксплуатации водохранилищ не способствует снижению темпов трансформации геологической среды и ее компонентов. Положение уровня воды в водоеме остается основным критерием для дальнейших прогнозов трансформации береговой зоны.

Работа выполнена в рамках интеграционной программы ИНЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей» по теме 3.2. «Опасные геологические процессы в Байкало-Монгольском регионе на территориях активного природопользования: сопоставление, оценка, прогноз».

При исследовании использовалось оборудование Центра коллективного пользования (ЦКП) «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН, г. Иркутск.

Список литературы

Бычков В. И. Эрозия почв в лесостепных районах Приангарья : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Иркутск, 1964. 26 с.

Кусковский В. С. Особенности формирования подпора подземных вод на глубоко-водных водохранилищах Сибири со скальными берегами // Инженерно-географические проблемы при строительстве в Сибири / отв. ред. В. Н. Сакс. Л. : Изд-во геогр. о-ва, 1974. С. 144–168.

Лешиков Ф. Н., Спесивцев В. И. Влияние сезонного промерзания на формирование берегов ангарских водохранилищ, сложенных лессовидными породами // Береговые процессы в криолитозоне / отв. ред. Ф. Э. Арз. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1984. С. 67–71.

Никифорова Г. П., Спесивцев В. И. Техногенные изменения природных условий Верхнего Приангарья // Тез. докл. IX конф. мол. науч. сотрудников по геологии и геофизике Вост. Сибири (Иркутск, 16–18 апр. 1980 г.). Иркутск : ИЗК СО РАН, 1980. С. 119–120.

Овчинников Г. И. Динамика береговой зоны ангарских водохранилищ : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук : 25.00.25. Иркутск, 2003. 50 с.

Овчинников Г. И., Павлов С. Х., Тржцинский Ю. Б. Изменение геологической среды в зонах влияния Ангаро-Енисейских водохранилищ. Новосибирск : Наука, 1999. 254 с.

Печеркин И. А. Геодинамика побережий Камских водохранилищ. Ч. 2. Геологические процессы. Пермь : ПГУ, 1969. 308 с.

Пиннекер Е. В., Вологодский Г. П. Гидрогеологические условия и вопросы изменения режима подземных вод на верхнем участке Братского водохранилища // *Вопр. спец. гидрогеологии Сибири и Дальнего Востока* / отв. ред. И. К. Зайцев. Иркутск, 1962. Вып. 1. С. 196–207.

Размывы берегов ангарских водохранилищ / Г. М. Пуляевский, А. В. Пинегин, Г. И. Овчинников, В. Л. Некрасов // *Изв. Вост.-Сиб. геогр. о-ва СССР*. 1971. Т. 68. С. 19–26.

Рыжов Ю. В. Рост оврагов на юге Сибири // *Российский фонд фундаментальных исследований в Сибирском регионе*. 1995. Т. 1. С. 46–47.

Тржцинский Ю. Б. Эволюция инженерно-геологических условий в зонах влияния водохранилищ Ангаро-Енисейского каскада ГЭС : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук : 25.00.08. Иркутск, 1994. 48 с.

Филиппов В. М. Динамика карста ангарских водохранилищ : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 25.00.08. Л., 1988. 17 с.

Хисматуллин Ш. Д. Эрозия на сельскохозяйственных землях Иркутской области // *География и природ. ресурсы*. 1991. № 4. С. 49–61.

Шенькман Б. М. Изменение гидрогеологической ситуации в долине р. Ангары в связи с зарегулированием стока // *Проблемы охраны геол. среды на примере Восточной Сибири* / отв. ред. Е. В. Пиннекер. Новосибирск : Наука, 1993. С. 103–116.

Collins B. D., Sitar N. Processes of coastal bluff erosion in weakly lithified sands, Pacifica, California, USA // *Geomorphology*. 2008. Vol. 97. P. 483–501. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.09.004

Gahalaut K., Gahalaut V. K., Pandey M. R. A new case of reservoir triggered seismicity: Govind Ballav Pant reservoir (Rihand dam), Central India // *Tectonophysics*. 2007. Vol. 439. P. 171–178. DOI:10.1016/j.tecto.2007.04.003.

A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst / F. Gutiérrez [et al.] // *Earth Sci. Rev.* 2014. Vol. 138. P. 61–88. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.08.002.

Jian W., Wang Zh., Yin K. Mechanism of the Anlesi landslide in the Three Gorges Reservoir, China // *Eng. Geol.* 2009. Vol. 108. P. 86–95. DOI: 10.1016/j.enggeo.2009.06.017.

Impact of large water level fluctuations on geomorphological processes and their interactions in the shore zone of a dam reservoir / H. Kaczmarek [et al.] // *J. Great Lakes Res.* 2016. Vol. 42. P. 926–941. DOI:10.1016/j.jglr.2016.07.024.

Kozyreva E. A., Trzhtsinsky Y. B. Karst and its correlation with other geological processes (with reference to the zone of influence of Bratsk Reservoir) // *Newsletter*. Guangxi Normal University Press, China, 2004. P. 67–82.

Mazaeva O., Khak V., Kozyreva E. Model of erosion-landslide interaction in the context of the reservoir water level variations (East Siberia, Russia): factors, environment and mechanisms // *J. Earth Syst. Sci.* 2013. Vol. 122. P. 1515–1533. DOI: 10.1007/s12040-013-0363-2.

Milanović P. Dams and Reservoirs in Karst / P. E. van Beynen (ed.) // *Karst Management*. Berlin : Springer, 2011. P. 47–73.

Characteristics, mechanism and development tendency of deformation of Maoping landslide after commission of Geheyan reservoir on the Qingjiang River, Hubei Province, China / S. Qi [et al.] // *Eng. Geol.* 2006. Vol. 86. P. 37–51. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.04.004.

Aftershocks series monitoring of the September 18, 2004 M=4.6 earthquake at the western Pyrenees: A case of reservoir-triggered seismicity? / M. Ruiz [et al.] // *Tectonophysics*. 2006. Vol. 424. P. 223–243. DOI: 10.1016/j.tecto.2006.03.037.

Trzcinski Yu. Gypsum karst in south of the Siberian Platform, Russia // *Int. J. Speleol.* 1996. Vol. 25 (3, 4). P. 293–296.

Trzhtsinskii Yu.B. Landslides along the Angara Reservoirs // *Bul. of JAEG.* 1978. Vol. 17. P. 42–43.

Shoreline erosion and aeolian deposition along a recently formed hydro-electric reservoir, Blöndulón, Iceland / O. K. Vilmundardóttir [et al.] // *Geomorphology.* 2010. Vol. 114. P. 542–555. DOI:10.1016/j.geomorph.2009.08.012.

Xia M., Ren G. M., Ma X. L. Deformation and mechanism of landslide influenced by the effects of reservoir water and rainfall, Three Gorges, China // *Nat. Hazards.* 2013. Vol. 68. P. 467–482. DOI:10.1007/s11069-013-0634-x.

Transformation of the Geological Environment in the Affected Area of the Reservoir of the Angarsk HPP Cascade

E. A. Kozyreva, V. A. Babicheva, O. A. Mazaeva

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk

Abstract. The creation of the reservoirs of the Angara HPP cascade caused enormous technogenic transformations of the geological environment and led to large-scale changes in its components and significant reconstruction of the entire set of conditions and factors. Indicators of the influence of the reservoir on the geological environment and its source itself are exogenous geological processes developing in the zone of influence of the reservoir. The article presents the results of long-term monitoring studies of the regime and conditions for local coastal geosystems functioning with exogenous processes complex that reflect the state of the natural environment its variation in space and time. Studies have shown that the shore zone of the Angara reservoirs, after long period of operation, has not yet reached the stage of stable equilibrium. Stable dynamics of abrasion is preserved, especially on shore slopes composed of loose sediments. The dynamics of block landslides displacement in the monitoring areas increased by several times: from 0,4–0,5 mm / year in natural conditions to 1,7–3,0 cm / year in technogenic conditions. It was established that the transformation of shore zone is enhanced as a result of geological processes interaction. New eolian-erosion, karst-erosion, abrasion-erosion mechanisms for the development of the erosional process not typical of natural conditions were formed. Karst processes are prominent. Maps of the current activity of the karst process in the southern part of the Bratsk reservoir for the last period of operation (since 2000) have been compiled. A burst of karst activity was noted in 2003, 2009 and 2011, which is closely related to periods of water level lowering after periods of its high standing. Two-stage model of landslide, erosion and abrasion process interaction at a high and low level in the reservoir are presented. Thus, the influence zone of the Angara cascade is high dynamic and determined by operational fluctuations in the reservoir water levels and is still undergoing transformation.

Keywords: reservoir affected area, landslides, abrasion, karst, mechanisms of process interaction.

For citation: Kozyreva E.A., Babicheva V.A., Mazaeva O.A. Transformation of the Geological Environment in the Affected Area of the Reservoir of the Angarsk HPP Cascade. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2018, vol. 25, pp. 66-87. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.25.66> (in Russian)

References

Bychkov V.I. *Eroziya pochv v lesostepnykh raionakh Priangar'ya. Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* [Erosion of soils in the forest-steppe districts of the Angara region. Cand. sci. diss. abstr.]. Irkutsk, 1964, 26 p. (in Russian)

Kuskovskii V.S. *Osobennosti formirovaniya podpora podzemnykh vod na glubokovodnykh vodokhranilishchakh Sibiri so skal'nymi beregami* [Features of formation a subtime of

underground waters on deep-water reservoirs of Siberia with rocky coast]. *Inzhenerno-geograficheskie problemy pri stroitel'stve v Sibiri* [Engineering and geographical problems at construction in Siberia]. Leningrad, Geographical Society Publ., 1974, pp. 144-168. (in Russian)

Leshchikov F.N., Spesivtsev V.I. *Vliyanie sezonnogo promerzaniya na formirovanie beregov angarskikh vodokhranilishch, slozhennykh lessovidnymi porodami* [Influence of seasonal frost penetration on formation of coast of the Angara reservoirs built up by loess-like rocks]. *Beregovye protsessy v kriolitozone* [Coastal processes in the permafrost zone]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984, pp. 67-71. (in Russian)

Nikiforova G.P., Spesivtsev V.I. *Tekhnogennyye izmeneniya prirodnykh uslovii Verkhne-go Priangar'ya* [Technogenic changes in natural conditions of the upper Angara region]. *Tezisy dokladov IX konferentsii molodykh nauchnykh sotrudnikov po geologii i geofizike Vostochnoi Sibiri (Irkutsk, 16-18 aprelya 1980 g.)*. [Proceedings of the 9-th conference of young research associates on geology and geophysics of Eastern Siberia]. Irkutsk, 1980, pp. 119-120. (in Russian)

Ovchinnikov G.I. *Dinamika beregovoi zony angarskikh vodokhranilishch. Avtoref. dis. ... d-ra geogr. nauk* [Dynamics of a coastal zone of the Angarsk reservoirs. D-r. sci. diss. abstr.]. Irkutsk, 1989, 21 p. (in Russian)

Ovchinnikov G.I., Pavlov S.Kh., Trzhtsin'skii Yu.B. *Izmenenie geologicheskoi sredy v zonakh vliyaniya Angaro-Eniseiskikh vodokhranilishch* [Change of the geological environment in zones of influence of Angara-Enisey reservoirs]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1999, 254 p. (in Russian)

Pecherkin I.A. *Geodinamika poberezhii Kamskikh vodokhranilishch. Ch. 2. Geologicheskie protsessy* [Geodynamics of coasts of the Kama reservoirs. P. 2. Geological processes]. Perm', PSU Publ., 1969, 308 p. (in Russian)

Pinneker E.V., Vologodskii G.P. *Gidrogeologicheskie usloviya i voprosy izmeneniya rezhima podzemnykh vod na verkhnem uchastke Bratskogo vodokhranilishcha* [Hydrogeological conditions and questions of change of the mode of underground waters on the top site of the Bratsk Reservoir]. *Voprosy spetsial'noi gidrogeologii Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Questions of special hydrogeology of Siberia and the Far East], 1962, vol. 1, pp. 196-207. (in Russian)

Pulyaevskii G.M., Pinegin A.V., Ovchinnikov G.I., Nekrasov V.L. *Razmyvy beregov angarskikh vodokhranilishch* [Washouts of coast of the Angara reservoirs]. *Izvestiya Vostochno-Sibirskogo geograficheskogo obshchestva SSSR* [News of the East Siberian geographical society of the USSR], 1971, vol. 68, pp. 19-26. (in Russian)

Ryzhov Yu.V. *Rost ovragov na yuge Sibiri* [Growth of ravines in the south of Siberia]. *Rossiiskii fond fundamental'nykh issledovaniy v Sibirskom regione* [The Russian Federal Property Fund in the Siberian region], 1995, vol. 1, pp. 46-47. (in Russian)

Trzhtsin'skii Yu.B. *Evolutsiya inzhenerno-geologicheskikh uslovii v zonakh vliyaniya vodokhranilishch Angaro-Eniseiskogo kaskada GES. Avtoref. dis. ... d-ra geol.-mineral. nauk* [Evolution of engineering-geological conditions in zones of influence of reservoirs of the Angara-Enisey cascade of hydroelectric power station. D-r. sci. diss. abstr.]. Irkutsk, 1994, 48 p. (in Russian)

Filippov V.M. *Dinamika karsta angarskikh vodokhranilishch. Avtoref. dis. ... kand. geol.-mineral. nauk* [Dynamics of a karst of the Angarsk reservoirs. Cand. sci. diss. abstr.]. Leningrad, 1988, 17 p. (in Russian)

Khismatullin Sh.D. *Eroziya na sel'skokhozyaistvennykh zemlyakh Irkutskoi oblasti* [Erosion on farmlands of the Irkutsk region]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources]. 1991, no. 4, pp. 49-61. (in Russian)

Shen'kman B.M. *Izmenenie gidrogeologicheskoi situatsii v doline r. Angary v svyazi s zaregulirovaniem stoka* [Change of a hydrogeological situation in the valley of the Angara River in connection with control of a drain]. *Problemy okhrany geol. sredy na primere vost.*

Sibiri [Problems of protection of the geological environment on the example of Eastern Siberia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1993, pp. 103-116. (in Russian)

Collins B.D., Sitar N. Processes of coastal bluff erosion in weakly lithified sands, Pacifica, California, USA. *Geomorphology*, 2008, vol. 97, pp. 483-501. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.09.004.

Gahalaut K., Gahalaut V.K., Pandey M.R. A new case of reservoir triggered seismicity: Govind Ballav Pant reservoir (Rihand dam), Central India. *Tectonophysics*, 2007, vol. 439, pp. 171-178. DOI:10.1016/j.tecto.2007.04.003.

Gutiérrez F., Parise M., De Waele J., Jourde H. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth Sci. Rev.*, 2014, vol. 138, pp. 61-88. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.08.002.

Jian W., Wang Zh., Yin K. Mechanism of the Anlesi landslide in the Three Gorges Reservoir, China. *Eng. Geol.*, 2009, vol. 108, pp. 86-95. DOI:10.1016/j.enggeo.2009.06.017.

Kaczmarek H., Mazaeva O.A., Kozyreva E.A., Babicheva V.A., Tyszkowski S., Rybchenko A.A., Brykała D., Bartczak A., Słowiński M. Impact of large water level fluctuations on geomorphological processes and their interactions in the shore zone of a dam reservoir. *J. Great Lakes Res.*, 2016, vol. 42, pp. 926-941. DOI:10.1016/j.jglr.2016.07.024.

Kozyreva E.A., Trzhtsinsky Y.B. Karst and its correlation with other geological processes (with reference to the zone of influence of Bratsk Reservoir). *Newsletter*, Guangxi Normal University Press, China, 2004, pp. 67-82.

Mazaeva O., Khak V., Kozyreva E. Model of erosion-landslide interaction in the context of the reservoir water level variations (East Siberia, Russia): factors, environment and mechanisms. *J. Earth Syst. Sci.*, 2013, vol. 122, pp. 1515-1533. DOI:10.1007/s12040-013-0363-2.

Milanović P. Dams and Reservoirs in Karst. P. E. van Beynen (ed). *Karst Management*. Berlin, Springer, 2011, pp. 47-73.

Qi S., Yan F., Wang S., Xu R. Characteristics, mechanism and development tendency of deformation of Maoping landslide after commission of Geheyan reservoir on the Qingjiang River, Hubei Province, China. *Eng. Geol.*, 2006, vol. 86, pp. 37-51. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.04.004.

Ruiz M., Gaspà O., Gallart J., Díaz J., Pulga, J.A., García-Sansegundo J., López-Fernández C., González-Cortina J.M. Aftershocks series monitoring of the September 18, 2004 M = 4.6 earthquake at the western Pyrenees: A case of reservoir-triggered seismicity? *Tectonophysics*, 2006, vol. 424, pp. 223-243. DOI:10.1016/j.tecto.2006.03.037.

Trzcinski Yu. Gypsum karst in south of the Siberian Platform, Russia. *Int. J. Speleol*, 1996, vol. 25 (3, 4), pp. 293-296.

Trzhtsinskii Yu.B. Landslides along the Angara Reservoirs. *Bul. of JAEG*, 1978, vol. 17, pp. 42-43. doi.org/10.1007/BF02634674.

Vilmundardóttir O.K., Magnússon B., Gísladóttir G., Thorsteinsson Th. Shoreline erosion and aeolian deposition along a recently formed hydro-electric reservoir, Blöndulón, Iceland. *Geomorphology*, 2010, vol. 114, pp. 542-555. DOI:10.1016/j.geomorph.2009.08.012.

Xia M., Ren G.M., Ma X.L. Deformation and mechanism of landslide influenced by the effects of reservoir water and rainfall, Three Gorges, China. *Nat. Hazards*, 2013, vol. 68, pp. 467-482. DOI:10.1007/s11069-013-0634-x.

Козырева Елена Александровна

кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая лаборатория инженерной геологии и геоэкологии Институт земной коры СО РАН Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128 тел.: 8(3952)42-58-99 e-mail: kozireva@crust.irk.ru

Kozyreva Elena Aleksandrovna

Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Head, Laboratory of Engineering and Geoecology Institute of the Earth's Crust 128, Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russian Federation tel.: 8(3952)42-58-99 e-mail: kozireva@crust.irk.ru

Бабичева Виктория Аркадьевна

кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
тел.: 8(3952)42-58-99
e-mail: khak@crust.irk.ru

Babicheva Viktoriya Arkadjevna

Candidate of Sciences (Geology and
Mineralogy), Research Scientist
Institute of the Earth's Crust
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
tel.: (3952)42-58-99
e-mail: khak@crust.irk.ru

Мазаева Оксана Анатольевна

кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
тел.: 8(3952)42-58-99
e-mail: moks@crust.irk.ru

Mazaeva Oksana Anatoljevna

Candidate of Sciences (Geology and
Mineralogy), Research Scientist
Institute of the Earth's Crust
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
tel.: (3952)42-58-99
e-mail: moks@crust.irk.ru

Дата поступления: 02.08.2018

Received: August, 02, 2018