



УДК 624.131.543 (282.256.346)

## **Эрозионно-оползневой тип взаимодействия в локальных береговых геосистемах (на примере Братского водохранилища)**

О. А. Мазаева ([moks@crust.irk.ru](mailto:moks@crust.irk.ru))

В. А. Хак ([khak@crust.irk.ru](mailto:khak@crust.irk.ru))

Е. А. Козырева ([kozireva@crust.irk.ru](mailto:kozireva@crust.irk.ru))

**Аннотация.** С позиций системного подхода рассматриваются структура, механизмы взаимодействия процессов в локальной береговой геосистеме под воздействием колебания уровня воды Братского водохранилища. Сравнительный анализ картографических моделей выявил динамику площадной пораженности исследуемой территории оползневыми и эрозионными процессами за период 2003–2007 гг. На основе сопоставления этих данных с уровенным режимом и основными процессообразующими факторами была предложена двухстадийная модель, отражающая последовательность взаимодействий процессов в локальных геосистемах при смене положений отметок уровня.

**Ключевые слова:** оползневые деформации, овражная эрозия, динамика процесса, уровенный режим, модель взаимодействия.

### **Введение**

Эрозионно-оползневой тип взаимодействия – одно из наиболее распространенных сочетаний геоморфологических процессов. Очень часто оползни генетически связаны с эрозионными процессами [5]. Возникновение оползней на береговых склонах связывают с боковой эрозией рек, абразией морских берегов [13; 14] или наполнением водохранилищ [16; 19]. Оползни и сплывы преобразуют вершины оврагов. Также под воздействием этих процессов происходит боковое расширение оврагов [20]. С другой стороны, в мире существует много примеров (случаев) развития оврагов в теле крупных оползней. Местами концентрации поверхностного стока и образования по ним оврагов могут быть депрессии в виде старых оползневых уступов [18]. Взаимное влияние этих процессов, механизм и последовательность их взаимодействия детально еще не изучены и будут рассмотрены для исследуемой территории впервые.

Изучение оползней во всем мире является актуальной проблемой в связи с их высокой катастрофичностью, приводящей к огромным социальным и экономическим убыткам, ухудшению инженерно-геологических условий строительства, эксплуатации сооружений, использования земель

[15]. Оползневые процессы очень широко распространены и постоянно сопровождают деятельность человека на склонах и откосах.

В России изучение комплекса береговых процессов явилось весьма актуальной задачей в связи с широкомасштабным строительством ГЭС на крупных реках европейской части России и Сибири в первой половине XX в. Были организованы специально оборудованные станции и полигоны, велись наблюдения. На берегах водохранилищ Ангарского каскада ГЭС, к которому относится Братское водохранилище, мониторинговые исследования были начаты в 1962 г., еще до наполнения водоема.

Братское водохранилище – крупное равнинное водохранилище с сезонными колебаниями уровня воды, достигающими 3–4 м и многолетними – 10 м. Такая величина сработки уровня предопределила значительные масштабы воздействия на прилегающие территории. Создание водохранилища вызвало активизацию и нарушение хода развития многих экзогенных процессов на его берегах. Овраги, устья которых выходят в береговую зону, подверглись изменениям: уменьшилась площадь, изменилась форма водосборных бассейнов, уменьшилась глубина базиса эрозии, процесс абразии вызвал смещение бровки береговых уступов.

Практически все унаследованные (то есть существовавшие на берегах реки до создания водохранилища) 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 многолетние исследования динамики оползней на Братском водохранилище показали, что в периоды, характеризующиеся низкими уровнями воды в водохранилище, происходит снижение оползневой деятельности [8]. Тржцинский Ю. Б. считал главной причиной образования новых и активизации старых оползней на водохранилищах Ангарского каскада ГЭС снижение прочности глинистых пород при обводнении [17].

Но существует другая точка зрения. Так, например, исследования старейшего оползня на одном из водохранилищ Китая [16] 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 связаны с морфометрическими и морфологическими особенностями водохранилищ, геолого-структурными особенностями участков, различным положением зоны скольжения относительно уровня воды в водоеме, что требует комплексного изучения объектов.

Целью исследования является выявление механизмов развития локальной геосистемы на основе анализа взаимосвязей результатов динамики взаимодействующих процессов с основными процессообразующими фак-

торами; оценка динамики процессов по результатам сравнительного анализа картографических моделей. Авторы предлагают двухстадийную модель эрозионно-оползневой типа взаимодействия в условиях колебания уровня водохранилища.

### **Объект исследования**

Исследуемый участок находится в лесостепной зоне южной части Братского водохранилища с годовой суммой осадков 300–400 мм. Распределение их в течение года крайне неравномерно, более 75 % годового количества осадков приходится на летний период с максимумом в июле–августе (25 % годовой суммы), характер этих осадков ливневый. По показателю эрозионного индекса осадков Уишмеера и Смита исследуемая территория характеризуется умеренными значениями, равными 2,5–5,0 [1].

Уровенный режим Братского водохранилища является одним из основных факторов, влияющих как на динамику подземных вод в зоне подпора, так и на развитие геологических и геоморфологических процессов на прилегающих территориях. Такие параметры, как амплитуда колебания, скорость подъема и снижения, продолжительность стояния на определенных (высоких или низких) отметках, а также годовой и многолетний ход в целом определяют это влияние [8].

Пораженность берегов Братского водохранилища оползневыми деформациями невелика. Их максимальная концентрация наблюдается в Окинской акватории, где оползневые деформации связаны с терригенными осадками ийской свиты ордовика, а также в Ангарской акватории с гипсангидритовыми породами кембрия и глинистыми разностями ордовика [8]. В связи со слабой освоенностью побережья в местах концентрации оползней последние отнесены к категории повышенной и умеренной опасности. Их активизация угрожает ценным земельным угодьям, в том числе водохранилищным лесным зонам.

Пораженность склона оползнями по состоянию на 2007 г. составляет около 4 тыс. м<sup>2</sup>, что в соответствии с классификацией [12] относит его к средним оползням. На аэрофотоснимках 1953 г. (до наполнения водоема) этот береговой склон не был поражен оползневыми процессами (рис. 1). С 1969 г., после наполнения водохранилища, в северной части участка началась добыча песка, и первые сведения об изменениях на склоне относятся к концу 1980-х гг. Можно предположить, что причиной образования деформаций могли стать создание водохранилища, разработка карьера или их взаимное влияние. Наши исследования на полигоне проводились уже в постэксплуатационный период, что исключает влияние на геодинамическое состояние такого техногенного фактора, как добыча песка карьерным способом.

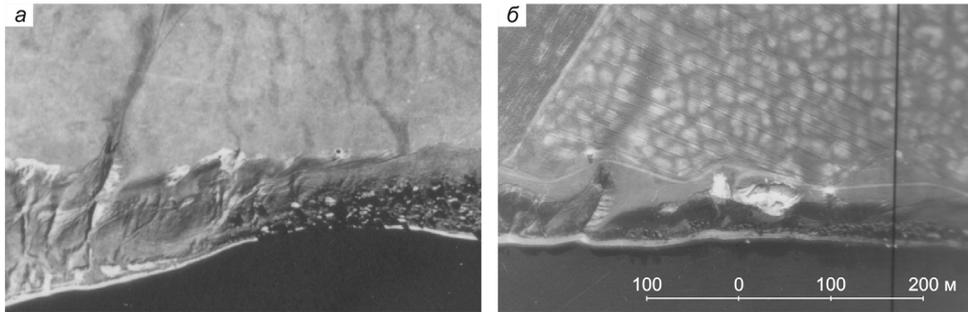


Рис. 1. Береговой склон в районе исследований:

а – до наполнения водохранилища; б – после наполнения водохранилища

Комплекс работ по изучению эрозионно-оползневому типу взаимодействия проведен в натуральных условиях береговой локальной геосистемы. По представлению авторов береговые локальные геосистемы – это участки побережий с развивающимися в их пределах комплексом парагенетически связанных экзогенных процессов, отражающих состояние системы и ее изменение во времени и пространстве. Береговые локальные геосистемы ограничены участками береговой зоны и находятся в зоне влияния подпора водоема [6].

Участок Быково – полигон для изучения эрозионно-оползневому взаимодействию – расположен на левобережье Братского водохранилища (рис. 2). По морфологии это оползневой склон северо-восточной экспозиции, протяженностью 250–300 м, осложненный эрозионными формами. Отмечаются оползневые цирки, древние овраги и активные современные промоины. Бровка стенки карьера осложнена эрозионными формами, вершинные врезы которых развиваются под воздействием суффозионно-провальных процессов. Древняя балка имеет более сглаженные формы, крутые задернованные склоны, тальвеговая часть заросла небольшими кустарниками. В ней обнаружены новые промоины. Современные овраги, прорезающие оползневой склон, развиваются унаследованно по ложбинам стока эрозионных форм верхних частей незатопленного склона. В южной и северной частях участка в коренных карстующихся породах, выходящих на поверхность, образовалась серия волноприбойных ниш, снижающих устойчивость склона.

Зону пляжа и абразионный уступ слагают породы гипсово-соленосно-карбонатной формации нижнего – среднего кембрия  $\text{Є}_{1-2}\text{lt}$ , состоящих из доломитов, известняков, гипсов, ангидритов и карбонатных брекчий. Эти коренные породы обнажаются в береговом уступе в южной и северной частях участка. В отдельных частях изучаемого участка эрозией вскрыты отложения осинской пачки верхоленской свиты среднего-верхнего кембрия  $\text{Є}_{2-3}\text{vl}_1^1$ . Эта пачка состоит из переслаивающихся мергелей и доломитов с редкими прослоями аргиллитов и алевролитов, маломощными пропластками и линзами гипса. В нижней части свита содержит глины с брекчиями красной и зеленой окраски.

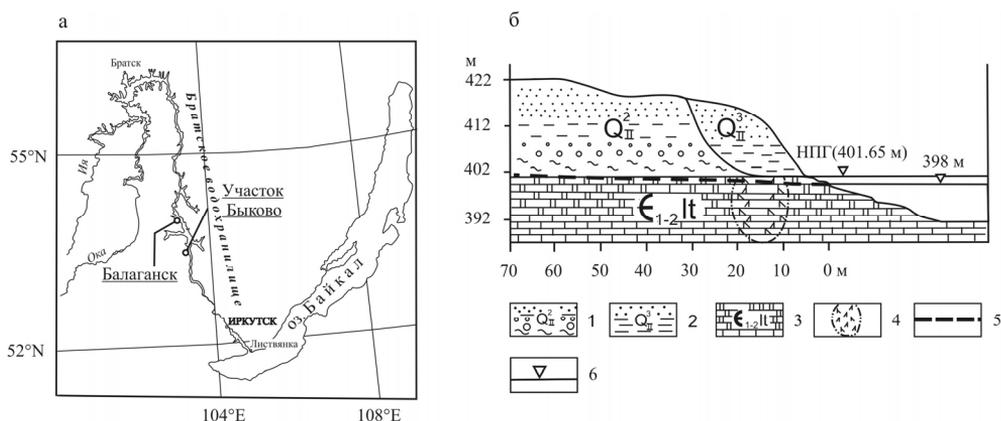


Рис. 2. Исследуемый участок Быково:

а – схема месторасположения; б – геологический разрез.

1 – аллювий VI террасы  $aQ_{II}^2$ : суглинки и глины темно-серые, коричнево-бурые и бурые с прослоями песков; 2 – аллювий V террасы  $aQ_{II}^3$ : преимущественно мелкие и тонкозернистые пески с мелким галечниковым материалом, в верхней части развиты супеси и суглинки; 3 – породы гипсово-соленосно-карбонатной формации нижнего-среднего кембрия  $C_{1-2}lt$ : доломиты, известняки, гипсы, ангидриты и карбонатные брекчии; 4 – предполагаемые карстовые полости, заполненные рыхлым обломочным материалом; 5 – уровень грунтовых вод; 6 – нормальный подпорный горизонт (НПГ)

В геоморфологическом строении рассматриваемого района прослеживаются фрагменты IV, V и VI эрозионно-аккумулятивных террас. Оползневой процесс развивается в среднечетвертичных грунтах ( $aQ_{II}$ ) фрагмента эрозионно-аккумулятивной террасы, представленных песком, песком с галькой, супесями и суглинками. Наполнение водоема привело к колебанию уровня подземных вод, дополнительному переувлажнению песков, обводнению суглинков и глин, в результате чего склон деформировался в виде смещения грунта по круглоцилиндрической поверхности.

### Методы исследования

Важным аспектом в изучении экзогенных геологических процессов является применение системного подхода [2; 4; 11]. С позиций этого подхода любой геологический процесс предстает как «форма движения, развития приповерхностной геосистемы в физическом времени, обусловленная ее взаимодействием с внешними средами или взаимодействием между элементами геосистемы» [2, с. 203]. Системность объекта раскрывается, прежде всего, через его связи и их типологию. Данная работа отражает современную тенденцию изучения не отдельного процесса, а сложной и многофакторной геосистемы, в которой развивается несколько процессов во взаимодействии друг с другом (оползни, эрозия и абразия).

В ходе настоящего исследования применена оригинальная методика, разработанная авторами для оценки геодинамической обстановки локальных геосистем на базе существующих региональных методик и ранее полученных результатов исследований, проводимых лабораторией инженерной геологии и геоэкологии ИЗК СО РАН на разных этапах от проектирования до современной эксплуатации Братского водохранилища. Комплексная оценка развития локальных геосистем с рассмотрением всех внутренних взаимодействий впервые осуществлена для Братского водохранилища в 2000 г. [6].

Разработанная методика предполагает выполнение трех блоков. Первый блок – это выбор ключевого участка посредством сбора и обработки материалов по закономерностям развития и активизации геологических процессов в зонах влияния водохранилищ в разные периоды времени; анализа условий и факторов развития подсистем до и после создания водоема, а также дешифрирования аэрофотоснимков. Второй – включает организацию и проведение мониторинговых исследований с разбивкой сети наблюдений и проведением топографо-геодезической съемки. На заключительном этапе производится обработка и анализ полученных данных с построением объемных картографических моделей, их сравнительным анализом, выявляются качественные и количественные взаимосвязи в геосистеме. При сравнительной оценке моделей анализ изменений положения характерных элементов форм процессов, сопоставление их динамики с природными и антропогенными факторами позволяет найти взаимосвязи между элементами системы и воздействие факторов на развитие всей системы и каждого элемента в отдельности.

#### ***Топографо-геодезическая съемка***

В настоящей работе на этапе проведения топографо-геодезической съемки при мониторинговых исследованиях на участке Быково использовалась традиционная теодолитная и тахеометрическая съемка с помощью теодолита Т-30. Для этого на склоне, не затронутом оползневыми деформациями, была разбита сеть из шести постоянных реперов, закрепленных на местности. Два висячих репера были стационарно закреплены в зоне пляжа. Осуществлена привязка реперов между собой: с каждой точки определялись прямые и обратные горизонтальные углы. Для съемки оползневых процессов отбивались: бровки стенок срыва, тыловые швы и бровки оползневых ступеней, подошва оползневого тела. Для эрозионных форм производилась съемка бровок стенок оврагов и днищ этих форм. Тахеометрическая съемка карьера осложнялась тем, что по бровке карьера развиваются эрозионно-суффозионные процессы. Поэтому на таких участках увеличивалась плотность точек измерения. Такие работы проводились ежегодно в летний период с 2003 по 2007 гг.

#### ***Комплексное исследование грунтов***

Для изучения среды развития взаимодействующих процессов производилось детальное опробование грунтов с проходкой расчисток и шурфов. В пределах участка Быково эти работы выполнялись на склоне, не за-

тронутым оползневыми деформациями, в зоне скольжения оползня, а также в естественных обнажениях эрозионных форм, расположенных в пределах оползневого тела и бортах карьера.

Комплексные лабораторные исследования выполнялись в лаборатории грунтоведения Аналитического центра Института земной коры СО РАН и включали определение комплекса показателей состава, микроструктуры грунтов, физических, физико-химических, деформационных и прочностных свойств грунтов с применением стандартных методик. Название грунта давалось по результатам гранулометрического анализа с полудисперсной подготовкой. Для оценки микроструктуры по результатам гранулометрического анализа были выполнены расчеты количества агрегатов по методике Т. Г. Рященко [9]. Тип структурной модели грунта определялся по размеру преобладающих структурных элементов и коэффициенту элементарности [10].

### **Оценка основных процессообразующих факторов**

Ежегодные обследования участков производились, как правило, в начале июля. Все изменения, которые фиксировались при этом, происходили в период с июля по июнь следующего года. Поэтому для выявления и анализа взаимосвязей динамики роста и процессообразующих факторов использовался этот же период. Детальная оценка климатического фактора и динамики уровня воды в водохранилище была представлена ранее [7]. Анализ основных процессообразующих факторов показал следующее.

Атмосферные осадки (как фактор) контролируют количество и режим смещений оползневых масс. Характер этого фактора двойственный, результаты его воздействия проявляются как в изменении свойств горных пород, слагающих оползневой склон (уменьшение прочности пород за счет их разуплотнения, набухания и размокания), так и в изменении напряженного состояния горных пород оползневого массива (формирование гидростатического и гидродинамического давления воды) [3]. При рассмотрении количества и характера атмосферных осадков как фактора оврагообразования выполнен анализ по периодам ливневого и талого стоков (табл. 1, 2). Выявлены благоприятные для развития оврагов периоды талого (2004–2006 гг.) и ливневого (июль–сентябрь 2004 г., июль–сентябрь 2006 г.) стока.

Уровенный режим регулирует сохранность оползневых масс на откосах. Абразия берегового склона при высоком уровне вызывает нарушение его равновесия и провоцирует новые оползневые смещения. Подрезка нижних частей оврагов, выходящих устьями на прибрежную отмель, также вызывает активизацию глубинной эрозии и приводит к увеличению объемов эрозионных форм.

Оползневые деформации на изучаемом береговом склоне относятся к типу оползней-сдвигов и оползней-сплывов. Оползневые процессы на бортах оврага, проявляющиеся в виде оползней-потоков, связаны с обильными осадками и составом, структурой и свойствами грунтов.

Таблица 1

Характеристика периода ливневого стока  
(по данным станции «Балаганск»)

Период		Количество осадков, мм	Число дней за период ливневого стока с осадками более			Макс. интенсивность осадков, мм/мин
			10 мм	20 мм	30 мм	
2003–2004	июль – сентябрь	412,3	6	1	1	0,01–0,21
	май – июнь		2	1	0	0,1–0,44
2004–2005	июль – сентябрь	423,7	7	2	1	0,03–0,83
	май – июнь		3	1	0	0,09–0,4
2005–2006	июль – сентябрь	320,3	3	1	0	0,03–0,85
	май – июнь		3	2	1	0,03–0,16
2006–2007	июль – сентябрь	512,1	9	5	4	0,02–2,10
	май – июнь		3	2	0	0,09–0,3
2007–2008	июль – сентябрь	236,6	0	0	0	0,04–2,12
	май – июнь		нет данных			

Таблица 2

Характеристика периода талого стока (по данным станции «Балаганск»)

Год	Среднемесячная температура воздуха, °С	Средняя макс. температура воздуха, °С	Средняя мин. температура воздуха, °С	Среднемесячная температура воздуха, °С	Средняя макс. температура воздуха, °С	Средняя мин. температура воздуха, °С	Общий наибольший запас воды в снеге, мм		Количество осадков, мм		Суммарное количество осадков (март+апр.), мм
	март			апрель			март	апрель	март	апрель	
2002	-7,0	-1,3	-13,9	-0,4	5,4	-5,7	38,0	13,0	6,8	10,9	17,7
2003	-10,6	-4,0	-17,1	1,5	7,8	-4,9	71,0	19,0	0,5	9,1	9,6
2004	-13,2	-6,7	-20,1	0,3	5,6	-5,8	65,0	57,0	13,6	6,0	19,6
2005	-9,4	-2,7	-16,6	0,6	6,1	-4,5	60,0	нет данных	5,2	28,0	33,2
2006	-10,5	-4,1	-18,1	-3,3	2,7	-10,4	67,0	68,0	4,8	5,2	10,0
2007	10,9	-5,1	-17,2	2,9	10,3	-3,6	53,0	35,0	8,4	12,4	20,8
2008	-5,5	0,3	-12,6	0,6	7,0	-6,2	39,0	12,0	5,1	18,6	23,7

Грунты, подверженные эрозионно-оползневым, оползневым и эрозионным процессам имеют различия в микроструктуре и свойствах грунтов (табл. 3, 4). Скелетно-агрегированная микроструктура и мелко- и крупнопылеватый элементарный тип структурной модели супесей и суглинков, высокопористых, межструктурные связи в которых обеспечиваются водо-

растворимыми солями (0,4–0,5 %) и повышенным содержанием карбонатов (34–66 %), более подвержены эрозионным процессам.

Для суглинка из зоны скольжения характерны более дисперсный состав и высокая степень агрегированности глинистой фракции. Структура грунта представлена преимущественно тонко-мелкопесчаными частицами и агрегатами, которые обладают меньшим сцеплением и более низкими прочностными показателями, т. е. характеризуются низкой устойчивостью к сдвиговым деформациям.

## Результаты и обсуждение

### Динамика

#### *Период 2003–2004*

Период 2003 г. характеризовался низкими уровнями воды, при этом наблюдалась активизация эрозионных процессов и стабилизация оползневых деформаций склона. В пределах отмели отмечалась серия абразионных уступов высотой 0,5–1,5 м, 0,35–0,39 м, активно размываемых эрозионными промоинами (рис. 3).

С мая по июнь 2004 г. произошло резкое повышение уровня на 2,7 м. Наблюдалась активизация оползневых процессов, превысившая активизацию овражной эрозии. В северной части участка произошло образование стенки срыва высотой 3,5 м, угол наклона зоны скольжения  $46^\circ$  (рис. 4). Сошедшие массы грунта практически полностью перекрыли среднюю и устьевую части оврага, который превратился в узкую шнурковую промоину. В центральном оползневом цирке грунтовый «язык» вышел к урезу воды.

Также после ливней 30 июня и 1 июля 2004 г. в песках, залегающих на глинистых породах, сформировался временный водоносный горизонт. Его разгрузка произошла на крутом оползневом склоне и по тальвегу оврага. Такое дополнительное увлажнение создало условия для активизации оползневых сплывов на крутых бортах оврага. Один из поверхностных оползней-потоков перекрыл устьевую часть оврага (рис. 5). Концентрация стока в днище эрозионной формы способствовала увлажнению грунтов, снижению их прочности, что благоприятно для развития оползневых процессов. Это подтвердили результаты лабораторных исследований грунтов.

При нивелировке оврага оползнями-потоками его ширина увеличилась, глубина уменьшилась. Количественно это выразилось в небольшом увеличении площади оползневых деформаций ( $+174 \text{ м}^2$ ) и также незначительном приросте площади участка, пораженного эрозионными процессами ( $+46 \text{ м}^2$ ) (табл. 5). Эрозионные формы, развивающиеся в борту карьера и независимые от уровня режима и оползней, также показали положительную, но незначительную динамику ( $+10 \text{ м}^2$ ). Это можно объяснить тем, что период ливневого стока 2003 г., несмотря на большое количество осадков, характеризовался их небольшой интенсивностью.

Таблица 3

## Структурные элементы грунта и типы микроструктуры

Размер структурного элемента, мм  Номер образца	Содержание агрегатов, %						Содержание свободных частиц, %						Тип микроструктуры
	A1	A2	A3	A4	A5	A	M1	M2	M3	M4	M5	M6	
	> 0,25	0,25– 0,05	0,05– 0,01	0,01– 0,002	0,002– 0,001	всего	> 0,25	0,25– 0,05	0,05– 0,01	0,01– 0,002	0,002– 0,001	< 0,001	
1–3	0,0	<b>24,7</b>	0,0	1,9	0,0	26,6	0,0	<b>29,6</b>	17,1	24,1	1,6	1,0	скелетно-агрегированная
1–4	0,4	<b>30,4</b>	0,0	2,4	0,0	33,2	0,5	<b>26,7</b>	20,5	15,7	1,8	1,6	скелетно-агрегированная
3–1	0,0	<b>6,9</b>	3,8	0,7	0,0	11,4	8,2	<b>39,2</b>	27,7	11,1	1,6	0,8	агрегированно-скелетная
3–2	0,7	<b>38,8</b>	0,0	0,0	0,0	39,5	0,4	<b>25,5</b>	21,4	9,5	3,0	0,7	скелетно-агрегированная
4	2,3	<b>35,3</b>	20,8	12,0	0,0	70,4	1,4	4,2	3,1	<b>20,1</b>	0,3	0,5	агрегированная
2–1	4,2	<b>37,3</b>	1,1	0,0	0,0	42,6	1,0	19,8	<b>31,4</b>	3,2	0,9	1,1	агрегированная
2–2	0,2	<b>21,7</b>	4,2	0,0	0,0	26,1	0,3	16,5	<b>46,2</b>	8,6	1,4	0,9	скелетно-агрегированная
2–3	0,7	<b>20,1</b>	4,8	0,0	0,0	25,6	0,9	17,5	<b>39,5</b>	13,3	2,4	0,8	скелетно-агрегированная
2–4	0,2	6,3	<b>11,9</b>	3,0	0,0	21,4	0,5	18,7	<b>35,1</b>	22,5	0,9	0,9	агрегированно-скелетная

Таблица 4

Типы структурной модели грунта

Размер структурного элемента, мм	Структурные элементы грунта соответствующей размерности, %						Коэффициент элементарности структурных элементов грунта, %					Тип структурной модели
	X1= A1+M1	X2= A2+M2	X3= A3+M3	X4= A4+M4	X5= A5+M5	X6	G1= M1/X1	G2	G3	G4	G5	
	> 0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,002	0,002–0,001	< 0,001	> 0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,002	0,002–0,001	
1–3	0,0	<b>54,3</b>	17,1	26,0	1,6	1,0	0,0	<b>54,5</b>	100,0	92,7	100,0	тонко-мелкопесчаная (0,25–0,05 мм), смешанная
1–4	0,9	<b>57,1</b>	20,5	18,1	1,8	1,6	55,6	<b>46,8</b>	100,0	86,7	100,0	
3–1	8,2	<b>46,1</b>	31,5	11,8	1,6	0,8	100,0	<b>85,0</b>	87,9	94,1	100,0	тонко-мелкопесчаная (0,25–0,05 мм), элементарная
3–2	1,1	<b>64,3</b>	21,4	9,5	3,0	0,7	36,4	<b>39,7</b>	100,0	100,0	100,0	тонко-мелкопесчаная (0,25–0,05 мм), смешанная
4	3,7	<b>39,5</b>	23,9	32,1	0,3	0,5	37,8	<b>10,6</b>	13,0	62,6	100,0	тонко-мелкопесчаная (0,25–0,05 мм), агрегированная
2–1	5,2	<b>57,1</b>	32,5	3,2	0,9	1,1	19,2	<b>34,7</b>	96,6	100,0	100,0	тонко-мелкопесчаная (0,25–0,05 мм), смешанная
2–2	0,5	38,2	<b>50,4</b>	8,6	1,4	0,9	60,0	43,2	<b>91,7</b>	100,0	100,0	крупнопылеватая (0,05–0,01 мм), элементарная
2–3	1,6	37,6	<b>44,3</b>	13,3	2,4	0,8	56,3	46,5	<b>89,2</b>	100,0	100,0	
2–4	0,7	25,0	<b>47,0</b>	25,5	0,9	0,9	71,4	74,8	<b>74,7</b>	88,2	100,0	

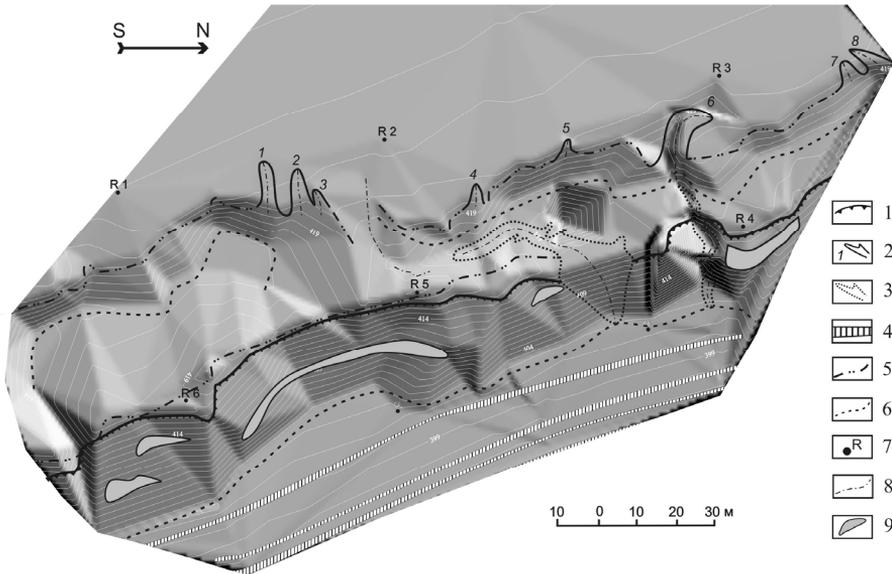


Рис. 3. Картографическая модель участка Быково по состоянию на 2003 г.:

1 – бровка срыва оползневого цирка; 2 – бровка эрозионной формы, развивающейся в борту карьера; 3 – бровка эрозионной формы, развивающейся в теле оползня; 4 – абразионный уступ; 5 – граница карьера; 6 – подошва оползневого склона и тыловой шов карьера; 7 – тальвег; 8 – оползневая ступень; 9 – репер

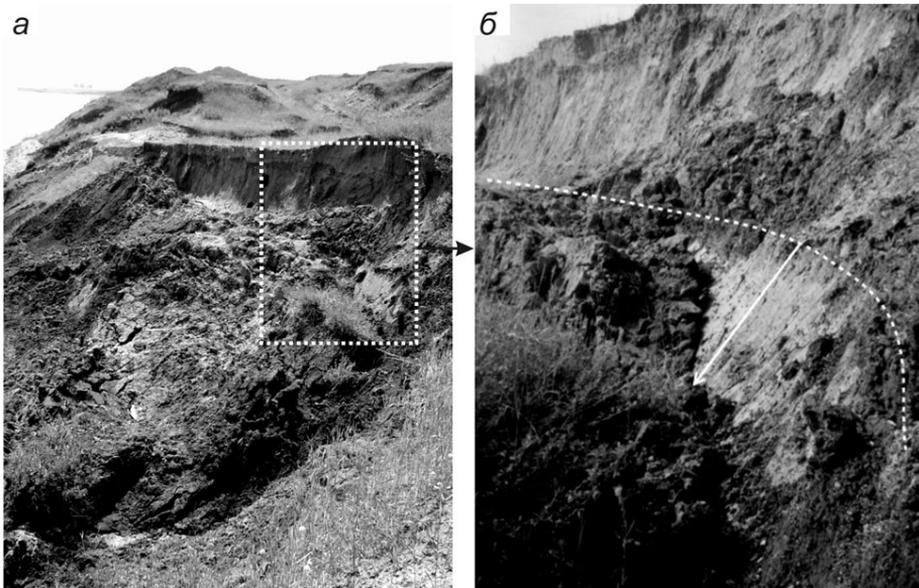


Рис. 4. Активные оползневые деформации в стенке оползневого срыва в 2004 г.:  
а – общий вид; б – увеличенный фрагмент стенки оползневого срыва



Рис. 5. Перекрытое оползнем-потоком устье оврага

Таблица 5

Динамика площадной пораженности участка оползневыми и эрозийными процессами по периодам исследований

Периоды	Изменение площади оползневых смещений, м <sup>2</sup>	Изменение площади эрозийных форм (сумма I+II)*, м <sup>2</sup>	Изменение площади эрозийных форм (I), м <sup>2</sup>	Изменение площади эрозийных форм (II), м <sup>2</sup>	Изменения площадей отдельных эрозийных форм (I), м <sup>2</sup>							
					1	2	3	4	5	6	7	8
07 июля 2003 – 03 июля 2004	174	56	10	46	28	11	3	8	5	-2	-14	-4
03 июля 2004 – 02 июля 2005	151	258	160	98	30	0	10	5	-4	25	14	45
02 июля 2005 – 05 июля 2006	746	100	18	82	63	50	-8	1	8	-12	-6	-43
05 июля 2006 – 29 июня 2007	- 814	17	27	-10	0	0	0	0	0	27	0	0

\* I – площадь эрозийных форм, развивающихся в борту карьера (базисом эрозии для этих форм является дно старого карьера и он в настоящее время стабилен); II – площадь эрозийных форм, выходящих устьями в береговую зону (развитие их связано с оползневыми процессами и уровенным режимом).

### ***Период 2004–2005***

Период лето–осень 2004 г. был влажным и характеризовался повышением уровня воды до значительных отметок (400 м). При этом происходила активизация оползневых процессов на склоне, которая выразилась в увеличении количества оползневых ступеней, но незначительно отразилась на величине площадной пораженности (+151 м<sup>2</sup>). Высокий уровень и закономерно связанное с ним абразионное отступление подножья оползневого склона привели к фактическому уменьшению площади оползневых смещений осенью 2004 г.

В весенний период 2005 г., который характеризуется нами как теплый, влажный, произошло перекрытие отмели тальными оползневыми массами. В результате подножье оползневого склона сместилось в сторону уреза на 10,5 м.

В результате за весь период 2004–2005 гг. был отмечен незначительный прирост площади оползневых смещений.

Эрозионные процессы показали максимальную положительную динамику (+258 м<sup>2</sup>), что можно объяснить благоприятными климатическими условиями этого периода. Это характерно для эрозионных форм обеих групп.

### ***Период 2005–2006***

Высокий уровень воды наблюдается в летне-осенний период 2005 г. Он достиг отметки 399,5 м, что было достаточно для абразионного размыва подножья оползневого склона, который в предыдущий период сместился в сторону уреза на 10,5 м, на более низкие гипсометрические отметки. В результате абразии были смыты репера висячих точек на отмели. Абразия склона спровоцировала активизацию оползневых процессов. Зафиксирован максимальный за период исследований прирост площадей оползневых цирков (+746 м<sup>2</sup>) за счет формирования новых оползневых ярусов. На активизацию оползневой и эрозионной деятельности в этот период повлияли большие снегозапасы весны 2006 г. В весенне-летний период отмечается интенсивный рост эрозионных форм второй группы (+82 м<sup>2</sup>).

### ***Период 2006–2007***

Этот период характеризуется максимальным уменьшением площади оползневых цирков (-814 м<sup>2</sup>), несмотря на рекордную влажность за весь анализируемый период (см. табл. 1) и самое высокое положение уровня воды. В отличие от периода 2004–2005 гг., когда также отмечались обильные осадки и высокий уровеньный режим, наблюдаемый период 2006–2007 гг. был экстремально влажным только в период ливневого стока 2006 г. Осенью 2006 г. уровень находился на максимальных отметках, что привело к абразионному отступлению подножья оползневого склона, которое по результатам этого периода составило 4,3 м. Это привело к тому, что мы не наблюдали оползневые массы на прибрежной отмели в июле 2007 г. После активизации оползневого процесса в результате обильных осадков и подрезки склона абразией произошло перекрытие устьевых частей отдельных оврагов оползневыми массами. Поэтому эрозионные формы, развиваю-

щиеся на оползневом склоне, показали отрицательную суммарную динамику площадного прироста  $-10 \text{ м}^2$  (рис. 6). Например, для двух отдельных крупных форм она составила  $-110$  и  $-50 \text{ м}^2$ .

Таким образом, оценивая динамику процессов за весь период исследований, можно сказать следующее. В период с 2003 по 2006 гг. отмечается увеличение площади оползневых смещений, отметки уровня воды в многолетнем ходе также закономерно повышаются. Максимальное увеличение площади оползневых смещений характерно для 2006 г., который характеризовался максимально обильными осадками и наивысшим за период наблюдений уровнем воды в водохранилище. В 2007 г. отмечалось значительное уменьшение площади оползневых деформаций. К этому результату, по нашему мнению, привела интенсивная абразия предыдущих лет, а, следовательно, и абразионное отступление подножья оползневого склона, которое зафиксировано по всем реперам начиная с 2005 г. Следует отметить, что в 2007 г. уменьшение оползневой пораженности склона сопровождается снижением уровня воды (рис. 6).

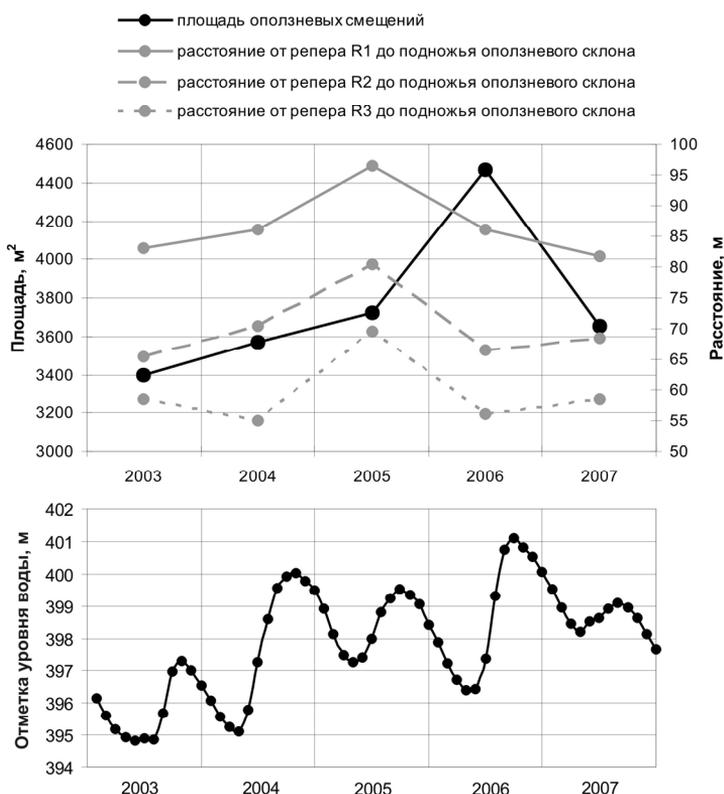


Рис. 6. Сопоставление колебаний уровня воды в водохранилище с динамикой оползневых смещений и абразионным отступлением подножья оползневого склона

### **Механизмы (модель эрозионно-оползневоего взаимодействия при различных положениях уровня воды)**

На основе анализа факторов, среды и динамики процессов предлагается описательная модель эрозионно-оползневоего взаимодействия в условиях колебания уровня Братского водохранилища. Представленная модель является двухстадийной и отражает последовательность взаимодействий в локальных геосистемах при смене положений отметок уровня.

#### ***1-я стадия***

При высоких уровнях водохранилища происходит абразионное разрушение береговых уступов, формирование волноприбойных ниш, отступление подножий, что, в свою очередь, снижает устойчивость 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. В засушливый период высокая степень объемной усадки грунтов может приводить к растрескиванию, расслаиванию и нарушению монолитности породы, а, следовательно, нарушать прочность массива и его устойчивость. Все это провоцирует активизацию оползневых процессов, которая проявляется в виде формирования новых оползневых цирков, смещения бровки уже существующего цирка вверх (вглубь) по склону, «выплывания» оползневых масс на прибрежную отмель (т. е. проявления, отражающиеся на площадной динамике процесса) или в увеличении количества оползневых ступеней, формировании вторичных деформаций внутри оползневого тела, заложении трещин бортового отпора (такие проявления процесса не отражаются на количественных показателях площадной динамики).

Активные проявления оползневых процессов вызывают значительные изменения морфологии берегового склона, что закономерно отражается на развитии эрозионных процессов. Формирование оползневых сплывов и оползней-потоков на бортах оврагов приводит к увеличению их ширины и уменьшению глубины, перекрытию устьевых частей отдельных эрозионных форм.

#### ***2-я стадия***

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 также как и конусы выноса, прорезаются эрозионными промоинами.

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

### **Выводы**

На основе полученных результатов были сделаны следующие выводы.

1. При сочетании процессов формируются более сложные геодинамические обстановки, чем при развитии одного типа процесса. Критерием направленности изменения геодинамических обстановок локальных береговых геосистем является уровенный режим Братского водохранилища.

2. Оползневые и эрозионные процессы в пределах данной локальной береговой геосистемы являются антагонистами, но их совместное воздействие по преобразованию берегового склона усиливается.

3. Динамика процессов и их взаимодействие характеризуются определенной цикличностью, соответствующей уровенному режиму водохранилища, который представляет собой чередующиеся этапы высокого и низкого уровня стояния воды. Стабилизация процессов может быть лишь относительной – до следующей смены положения уровня.

4. Высокие отметки уровня воды в водохранилище приводят к активизации оползневой деятельности. Нарушение устойчивости склона провоцируется абразионной подрезкой основания (берегового уступа) и обводнением зоны скольжения.

5. Оползневые процессы на бортах оврага, проявляющиеся в виде оползней-потоков, связаны с обильными осадками и могут приводить к значительному увеличению ширины оврага и уменьшению его глубины.

6. Абразионный размыв берегового склона вызывает нарушение продольного профиля равновесия эрозионных форм, выходящих устьями на прибрежную отмель. При понижении уровня воды в водохранилище происходит активизация глубинной эрозии. Интенсификация суффозионно-просадочных процессов, вызванная снижением уровня, способствует линейному росту оврагов.

7. Грунты, подверженные эрозионно-оползневому, оползневому и эрозионным процессам имеют различия в микроструктуре и свойствах грунтов.

### **Список литературы**

1. Пространственно-временной анализ динамики эрозионных процессов на юге Восточной Сибири / О. И. Баженова [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1997. – 208 с.
2. Бондарик Г. К. Общая теория инженерной (физической) геологии / Г. К. Бондарик. – М. : Недра, 1981. – 256 с.
3. Иванов И. П. Инженерная геодинамика / И. П. Иванов, Ю. Б. Тржцинский. – СПб. : Наука, 2001. – 416 с.
4. Каган А. А. Инженерно-геологическое прогнозирование / А. А. Каган. – М. : Недра, 1984. – 196 с.

5. *Ломтадзе В. Д.* Инженерная геология. Инженерная геодинамика / В. Д. Ломтадзе. – Л. : Недра, 1977. – 479 с.
6. *Мазаева О. А.* Оценка взаимодействия экзогенных процессов в локальных береговых геосистемах Братского водохранилища / О. А. Мазаева, Е. А. Козырева, Ю. Б. Тржцинский // География и природные ресурсы. – 2006. – № 3. – С. 81–86.
7. *Мазаева О. А.* Оценка основных процессообразующих факторов развития экзогенных процессов в локальных природно-технических геосистемах (на примере участка Быково, Братское водохранилище) / О. А. Мазаева, В. А. Хак, Е. А. Козырева // Вестн. ИрГТУ. – 2011. – № 2. – С. 41–46.
8. *Овчинников Г. И.* Изменение геологической среды в зонах влияния Ангаро-Енисейских водохранилищ / Г. И. Овчинников, С. Х. Павлов, Ю. Б. Тржцинский. – Новосибирск : Наука. Сиб. издат. фирма РАН, 1999. – 254 с.
9. Анализ микроструктуры лессов из района Северного лессового плато Китая / Т. Г. Рященко [и др.] // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2000. – № 3. – С. 234–240.
10. *Рященко Т. Г.* Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь) / Т. Г. Рященко. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2010. – 287 с.
11. *Юдин Э. Г.* Системный подход и принцип деятельности / Э. Г. Юдин. – М. : Наука, 1978. – 392 с.
12. *Cornforth D. H.* Landslides in practice: investigation and remedial/preventive options in soils / D. H. Cornforth. – Wiley, 2005.
13. *Fiorillo F.* Geological features and landslide mechanisms of an unstable coastal slope (Petacciato, Italy) / F. Fiorillo // Engineering Geology. – 2003. – Vol. 67. – P. 255–267.
14. *Isika N. S.* Assessment of a coastal landslide subjected to building loads at Sionop, Black Sea region, Turkey, and stabilization measures / N. S. Isika, V. Doyuranb, R. Ulusayc // Engineering Geology. – 2004. – Vol. 75. – P. 69–88.
15. Lessons Learnt from Landslide Disasters in Europe: Proceedings of the NEDIES Workshop on Lessons Learnt from Landslide Disasters. Report EUR 20558 EN / ed. J. Hervas. – Ispra, Italy, 2003.
16. Characteristics, mechanism and development tendency of deformation of Mapping landslide after commission of Geheyuan reservoir on the Qingjiang River, Hubei Province, China / S. Qi [et al.] // Engineering Geology. – 2006. – Vol. 86. – P. 37–51.
17. *Trzhtsinskij Yu. B.* Landslides along the Angara reservoirs / Yu. B. Trzhtsinskii // Bulletin of the International Association of Engineering Geology and the Environment. – 1978. – Vol. 17, N 1. – P. 42–43.
18. *Valentin C.* Gully erosion: Impacts, factors and control / C. Valentin, J. Poesen, Y. Li // Catena. – 2005. – Vol. 63. – P. 132–153.
19. Mechanism for the rapid motion of the Qianjiangping landslide during reactivation by the first impoundment of the Three Gorges Dam reservoir, China / F. Wang [et al.] // Landslides. – 2008. – Vol. 5, N 4. – P. 379–386.
20. Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques / J. A. Zinck [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2001. – Vol. 3, N 1. – P. 43–53.

## Erosion and Landslide Type of Interaction in the Local Shore Geo-Systems: a Case Study of the Bratsk Reservoir

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

**Annotation.** The article deals with the mechanisms, mutual influence, succession of erosion-landslide interaction in the local shore geo-system in the context of water-level fluctuations of the Bratsk Reservoir in the system approach. Comparative analysis of cartographic models investigated dynamics of area that is affected by landslide-erosion processes over the period of 2003 through 2007. On the basis of comparison of the data with the level regime and major process triggering factors, the current study proposes a two-staged model, reflecting succession of process interaction in the local geo-systems at changing level marks.

**Key words:** landslide deformations, gully erosion, dynamics of process, water level regime, model of interaction.

*Мазаева Оксана Анатольевна*  
кандидат геолого-минералогических  
наук, научный сотрудник  
Институт земной коры СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128  
тел.: (3952) 42–58–99

*Mazaeva Oksana Anatolievna*  
Ph. D. in Geology and Mineralogy  
Research Scientist  
Institute of the Earth Crust SB RAS  
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033  
tel.: (3952) 42–58–99

*Хак Виктория Аркадьевна*  
кандидат геолого-минералогических  
наук, научный сотрудник  
Институт земной коры СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128  
тел. (3952) 42–58–99

*Khak Viktoria Arkadievna*  
Ph. D. in Geology and Mineralogy  
Research Scientist  
Institute of the Earth Crust SB RAS  
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033  
tel.: (3952) 42–58–99

*Козырева Елена Александровна*  
кандидат геолого-минералогических  
наук, заведующая лабораторией  
Институт земной коры СО РАН;  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128  
тел. (3952) 42–58–99

*Kozyreva Elena Aleksandrovna*  
Ph. D. in Geology and Mineralogy  
Head of the Laboratory  
Institute of the Earth Crust SB RAS  
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033  
tel.: (3952) 42–58–99