

Оригинальная статья / Original article

УДК 528.946

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-209-220>

## Картографирование морфосистем как основа мониторинга геологической среды водохранилищ

© В.П. Ступин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Исследование направлено на обоснование, разработку и апробацию методологических, методических и технологических принципов геоинформационного картографирования в интересах организации мониторинга геологической среды Ангарских водохранилищ. Методологической основой картографирования является теория морфосистем. Она позволяет выполнить классификацию рельефа и выявить его иерархию на основе его природной делимости на морфоструктурные, бассейновые и склоновые системы. Карты береговых морфосистем служат основой для морфодинамического анализа берегов и определения скоростей их размыва. Информационная основа картографирования морфосистем – автоматизированная база съемочных, картографических и литературно-справочных данных. Основными источниками информации являются материалы дистанционного зондирования и данные полевых инструментальных наблюдений на эталонных участках. Технологическая составляющая – геоинформационное картографирование, позволяющее моделировать и выполнять динамический анализ береговых морфосистем на разных масштабных и временных уровнях. В ходе работы автором было определено понятие «зона влияния водохранилищ» с точки зрения динамики морфосистем. Выполнена классификация берегов водохранилищ в интересах их картографирования. Определены возможности космических снимков для дешифрирования этих морфосистем. Разработано специальное содержание составляемых карт. Создана система условных знаков для карт морфосистем. Составлены авторские карты морфосистем зоны влияния каскада Ангарских водохранилищ. Разработана и апробирована методика морфодинамического анализа берегов водохранилищ. Выполнен ретроспективный и перспективный морфодинамический анализ эталонных участков, выявивший скорости разрушения берегов в прошлом, настоящем и будущем. В результате можно сделать вывод о том, что геоинформационное картографирование и морфодинамический анализ береговых морфосистем зоны влияния водохранилищ позволяют создать основу для оперативного мониторинга геологической среды как каскада крупных искусственных резервуаров Ангары, так и аналогичных водохранилищ.

**Ключевые слова:** картографирование морфосистем, морфодинамический анализ, мониторинг геологической среды, размыв берегов водохранилищ

**Информация о статье:** Дата поступления 5 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 7 мая 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Ступин В.П. Картографирование морфосистем как основа мониторинга геологической среды водохранилищ. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2019. Т. 42. № 2. С. 209–220. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-209-220.

## Morphosystems mapping as the basis for monitoring water reservoirs' geological environment

© Vladimir P. Stupin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The purpose of the study has been to substantiate, develop and test the methodological, methodical and technological principles of geoinformation mapping for monitoring the geological environment of the Angara water reservoirs. The research methodology is based on the concept of morphosystems that makes it possible to classify the relief and identify its dynamic hierarchy at three levels of generalization: morphostructure, basin, and slope. Based on the shoreline morphosystems maps, a morphodynamic analysis of the shores has been conducted, and the erosion rate has been determined. The information component of the morphosystems mapping is a computerized database containing survey, cartographic, and reference data. The main sources of information are remote sensing and field instrumental observation data from the model sites. The technological component is

geoinformation mapping that allows modeling and dynamic analysis of the shoreline morphosystems at different scale and time levels. The 'reservoir influence zone' concept has been defined from the point of view of the morphosystems dynamics. For mapping purposes, the reservoir shores have been classified. The potential use of satellite images for decoding the morphosystems has been evaluated. A specific content of the compiled maps has been created. A system of notation conventions for the morphosystems' maps has been developed. Authoring maps of the influence zone morphosystems for the Angara reservoir cascade have been compiled. A method of morphodynamic analysis of the reservoir shores has been developed and tested. The retrospective and prospective morphodynamic analysis of the model sites have defined the erosion rate in the past, present and future. The results of the study infer that based on the geoinformation mapping and morphodynamic analysis of the shoreline morphosystems of the reservoir influence zone, prompt monitoring of the geological environment can be done for large artificial water reservoirs such as the Angara cascade reservoirs.

**Keywords:** morphosystems mapping, morphodynamic analysis, geological environment monitoring, reservoir shore erosion

**Information about the article:** Received April 5, 2019; accepted for publication May 7, 2019; available online June 27, 2019.

**For citation:** Stupin V.P. Morphosystems mapping as the basis for monitoring water reservoirs' geological environment. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 2, pp. 209–220. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-209-220.

### Введение

Одним из важнейших факторов, определяющих состояние геологической среды юга Восточной Сибири, является создание и эксплуатация крупных гидротехнических сооружений на р. Ангаре. В состав Ангарского каскада входят четыре гидроузла: Иркутский, Братский, Усть-Илимский и Богучанский. Сооружение этих гидроузлов привело к образованию грандиозного каскада водохранилищ. Общая площадь затопления составляет почти 10000 км<sup>2</sup>; протяженность водохранилищ с юга на север – около 1800 км; глубина затопления местами превышает 100 м. Создание такого грандиозного гидроузла привело к быстрому и коренному перераспределению литодинамических потоков и изменению структуры морфогенеза затопленных и прилегающих территорий<sup>1,2</sup> [1–6].

Затопленные пространства перешли в субаквальный литодинамический режим, а в их пределах произошла смена эрозионно-денудационных процессов на процессы абразионного размыва и аккумуляции. В границах субаэральных затопленных территорий имело место поднятие и смещение местных базисов денудации, изменение уровня грунтовых вод и, следовательно, перестройка литодинамических потоков всего побережья.

Зоны влияния водохранилищ подвержены воздействию динамичных экзогенных процессов, изучение воздействия которых на геологическую среду необходимо как с теоретической, так и с практической точки зрения. Одной из важнейших задач такого рода исследований является организация комплексного оперативного мониторинга геологической среды этих обширных территорий, которая невозможна без теоретического

---

<sup>1</sup> Тржцинский Ю.Б., Козырева Е.А., Мазаева О.А. Активизация экзогенных геологических процессов под воздействием водохранилищ // О состоянии окружающей природной среды Иркутской области в 2000 году: гос. докл. Иркутск, 2001. С. 188–190. / Trzhtsinckii Yu.B., Kozyreva E.A., Mazaeva O.A. Activation of exogenous geological processes under the influence of water reservoirs // On the environmental state of the Irkutsk Region in 2000: State report. Irkutsk, 2001. P. 188–190.

<sup>2</sup> Тржцинский Ю.Б., Овчинников Г.И. Окончательный отчет по теме: «Мониторинг экзогенных геологических процессов береговой зоны Иркутского и Братского водохранилищ». Т. 1. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2004. 250 с. / Trzhtsinckii Yu.B., Ovchinnikov G.I. Exogenous geological processes monitoring for the shoreline of the Irkutsk and Bratsk water reservoirs: Final report. Vol. 1. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS Publ., 2004. 250 p.

обоснования границ и внутреннего деления зоны влияния водохранилищ, а также нанесения их на картографическую основу [7–10].

Целью настоящего исследования стали разработка и апробация методологического, методического и технологического обоснования организации геоинформационного картографического мониторинга геологической среды каскада Ангарских водохранилищ.

### **Материалы и методы исследования**

Пространственной основой и эффективным инструментом мониторинга являются тематические карты, создаваемые на базе трех главных составляющих: методологической, информационной и технологической.

Методология картографирования является его теоретическим стержнем и базируется на концепции морфосистем и принципах морфодинамического анализа, которые постулируют естественную дифференциацию рельефа на трех ступенях иерархии земной поверхности: на уровне морфосистем, бассейнов и склонов [11]. В свою очередь, дефиниция морфосистем зоны влияния водохранилищ позволяет выполнить их районирование и специализированное картографирование, главным образом на двух последних из указанных уровней – бассейновом и склоновом. В бассейнах осуществляется сбор и перераспределение потоков талых, дождевых и подземных вод, а также литодинамических потоков и наносов. Быстрее всего при формировании новых урезом наполняющихся водохранилищ перестраиваются склоновые морфосистемы.

Бассейновые морфосистемы ограничены главным водоразделом и имеют только один выход через тальвег водотока высшего порядка, напрямую открывающийся на водохранилище. Они могут быть осложнены бассейнами низших порядков, тальвеги которых имеют

древовидный рисунок и контролируют нисходящие литодинамические потоки. Элементарные бассейны первого порядка представляют собой конструктивные парагенезы склонов, которые могут расчленять водотоки нулевого порядка – эрозионные борозды, которые лишь повторяют профили материнских склонов, осложняют их и не образуют собственных бассейнов.

Исходя из изложенных выше теоретических принципов, применительно к специфике водохранилищ ангарского каскада нами разработана классификация его береговых морфосистем, а также методика их картографирования и морфодинамического анализа [12]. В основу дефиниции и классификации морфосистем положен метод дискретизации и ранжирования земной поверхности на основе анализа морфологии рельефа и ее связей с факторами морфогенеза. Морфология служит одновременно индикатором наличия, и основой формирования как природных, так и техногенных морфосистем, характеризующихся целостностью и относительной устойчивостью своей внутренней структуры, обмена веществом и энергией и т. д. [11].

Источниками информации для морфосистемного картографирования служат аэрокосмические снимки, цифровые модели, картографические и литературно-справочные материалы. Их совокупность составляет гибкую и постоянно пополняемую базу исходных данных. Кроме того, в состав указанной базы данных входят составляемые карты на стадии предварительной и промежуточной обработки, архивные снимки, разного рода иллюстративные и другие материалы.

Технологическая составляющая представляет собой географическую информационную систему, так как геоинформационное картографирование позволяет быстро и корректно выполнить анализ и синтез факторов и условий

формирования и развития береговых морфосистем на разных масштабных и временных уровнях.

В настоящее время создание любых картографических моделей действительности сложно представить без применения средств и возможностей цифрового геоинформационного картографирования, которые вывели классическую картографию на новый уровень оперативности, наполненности и качества выходной продукции. Не является исключением и создание картографической основы в интересах инженерно-геологического мониторинга зоны влияния водохранилищ. Технологии с применением геоинформационных систем являются незаменимыми, эффективными и гибкими инструментами для научных, ведомственных, административных и других организаций при выявлении, территориальной привязке, изучении и оценке абразионных, оползневых, гравитационных, карстовых, биогенных и других негативных процессов, протекающих в береговой зоне и за ее пределами, а также при их прогнозе, планировании и управлении мероприятиями по ликвидации последствий этих процессов.

На сегодняшний день разработано много зарубежных и отечественных геоинформационных систем, каждая из которых обладает своими программными и технологическими особенностями со своими достоинствами и недостатками, но которые позволяют получить на выходе вполне кондиционную картографическую продукцию примерно одинакового качества. Одной из лучших программ является модульная полнофункциональная система Esri ArcGIS, технологические возможности которой позволяют успешно выполнять цифровое картографирование любой сложности.

Необходимым условием геоинформационного картографирования морфосистем является наличие цифровой модели рельефа – основного источника о

морфологии и морфометрии земной поверхности. По цифровым моделям рельефа в автоматическом режиме реализуются функции пространственного анализа земной поверхности, выявляются контуры водосборных бассейнов разных порядков, производится построение сети тальвегов и водоразделов, проводятся изогипсы и изобаты, составляются карты крутизны склонов, горизонтальной и вертикальной расчлененности, моделируются зоны подтопления, производятся гидрогеологические расчеты и построения, реализуются возможности построения временных рядов динамики морфосистем и т. д.

Принципы классификации картографируемых берегов и методики картографирования зоны воздействия водохранилищ подстроены под широкое использование материалов дистанционного зондирования, которые являются основным источником информации для последующей интерполяции полевых данных и оперативного картографирования протяженных береговых линий и обширных площадей зон влияния всех водохранилищ Ангарского каскада в условиях ограниченного финансирования и сжатых сроков работ. Поэтому в основу классификации берегов положен индикационный морфотопологический принцип, так как именно морфология и топологические связи (парагенезы, сукцессии) рельефа есть результат прошлого, основа настоящего и предпосылка его будущего развития. Таким образом, рельеф является индикатором природных и техногенных морфосистем, характеризующихся целостностью и относительной устойчивостью своей внутренней структуры, обмена веществом и энергией и т.д.

С учетом сказанного выше под переработкой береговых морфосистем понимается процесс совокупного воздействия на береговую зону различных факторов, проявившихся в результате нарушения динамического равновесия в ходе

формирования молодых водохранилищ и приводящих к перестройке прежде равновесных береговых и прибрежных морфосистем. Процессы формирования и переформирования берегов водохранилищ протекают как в зоне непосредственного контакта водной массы с дном и берегом, так и в пределах прилегающих к берегу субаэральных и субаквальных морфосистем – в зоне опосредованного контакта.

Основными факторами, определяющими границы, тип, облик и интенсивность переработки морфосистем ангарских водохранилищ являются:

- геоморфологический (морфология и топология рельефа);
- инженерно-геологический (устойчивость пород, слагающих территорию, к выветриванию и денудации);
- гидрологический (ветровой и волновой режимы, колебания уровня, стоковые и волновые течения, ледовые условия);
- ландшафтный (тип климата, растительный покров);
- антропогенный (техногенная нарушенность территорий).

Перечисленные факторы положены в основу зонирования морфосистем территории исследований. Разрабатываемая классификация должна быть картографичной, то есть служить основой для последующего картографирования. Рассмотрим подробнее основные принципы дефиниции морфосистем в порядке приоритетности факторов.

Выявление и последующее ранжирование каскадов береговых морфосистем, прежде всего, производится по картам и материалам дистанционного зондирования Земли с использованием морфологических и морфометрических признаков, определяющих динамику берегов, а также по пространственным связям элементов каскада друг с другом (топологии). Затем рассматриваются особенности инженерно-геологических

условий (грунты). Далее учитывается положение береговых морфосистем в определенных географических ландшафтах. Наконец, определяется роль антропогенного воздействия на береговую зону.

Таким образом, приоритет отдается пластике и топологии рельефа, так как именно они в первую очередь определяют направленность морфогенеза данной морфосистемы и закономерности ее структуры нисходящих литодинамических потоков под воздействием силы тяжести. Выделяются следующие типы морфосистем:

- 1) субаквальные системы подводных склонов и ложа водохранилищ:
  - глубже слоя воздействия волн, где преобладает отложение наносов,
  - в слое волнового воздействия, где преобладает размыв грунтов;
- 2) осыхающие морфосистемы, периодически затапливаемые в результате многолетних и сезонных колебаний уровня водохранилища;
- 3) подтопленные субаэральные морфосистемы:
  - приуроченные к склонам, непосредственно опирающимся на урез водохранилищ или на осыхающие абразионные террасы и пляжи,
  - приуроченные к выположенным устьевым участкам днищ падей, открывающихся в водохранилище, а также к низким побережьям и островам;
- 4) морфосистемы опосредованного воздействия, приуроченные к каскадам склонов, опирающимся на контактирующие с акваторией скаты.

Классический каскад береговых склонов представлен на рис. 1. Типы берегов дешифрируются на аэрокосмических снимках по наличию или отсутствию четких индикационных морфодинамических элементов: клифа, бенча, пляжа.

Морфодинамические типы берегов определяются по материалам дистанционного зондирования Земли по соотношению абразионных и аккумулятивных элементов в их пределах.

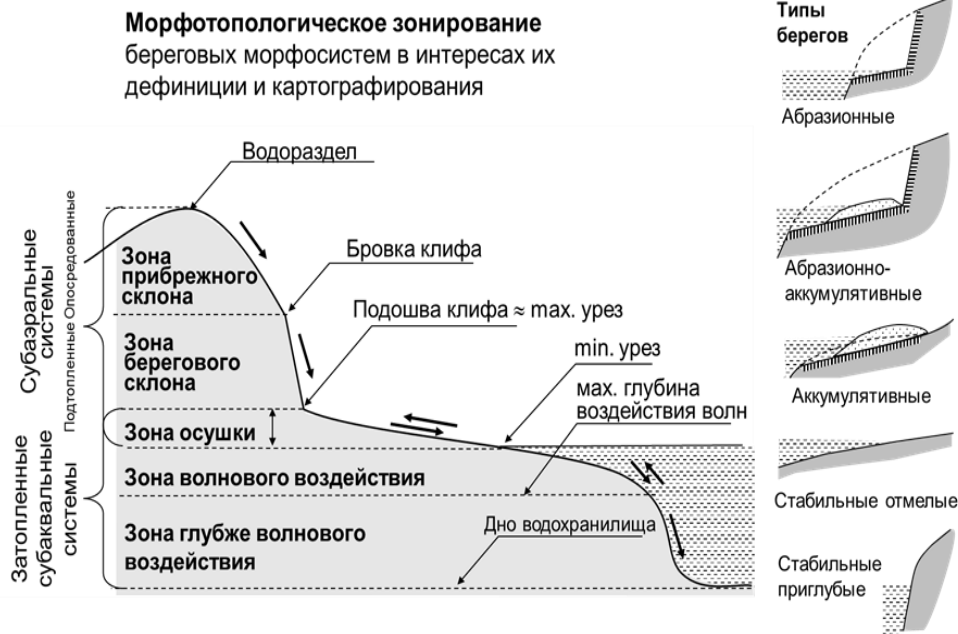


Рис. 1. Каскад береговых морфосистем  
Fig. 1. Cascade of shoreline morphosystems

Абразионные берега дешифрируются по наличию четко выраженного клифа и практическому отсутствию пляжа. Они формируются в условиях преобладания размыва береговых склонов над отложением наносов, что возможно при интенсивном волнении в сочетании с постоянным выносом образующихся наносов интенсивными течениями.

Абразионно-аккумулятивный тип берегов развивается в условиях равновесия абразионного и аккумулятивного процесса. Для них характерен полный классический набор береговых элементов: абразионного уступа, абразионной террасы с пляжем, подводной аккумулятивной призмы наносов. Такие берега обычно сложены дисперсными, а также полускальными или сильно разрушенными скальными грунтами.

Аккумулятивные берега сложены рыхлыми наносами, принесенными извне волнами и течениями и отложенными в условиях ветровой тени. Этот тип берегов встречается редко в виде небольших песчаных кос и зачаточных пляжей при отсутствии активных абразионных уступов.

Стабильные берега выглядят практически неизменными процессами абразии и аккумуляции, а на аэрокосмических снимках у них не обнаруживается ни резко очерченная абразионная терраса, ни светлая полоска пляжа. Такие берега приурочены либо к выходам устойчивых к размыву твердых скальных пород, либо к устьям подтопленных речных долин.

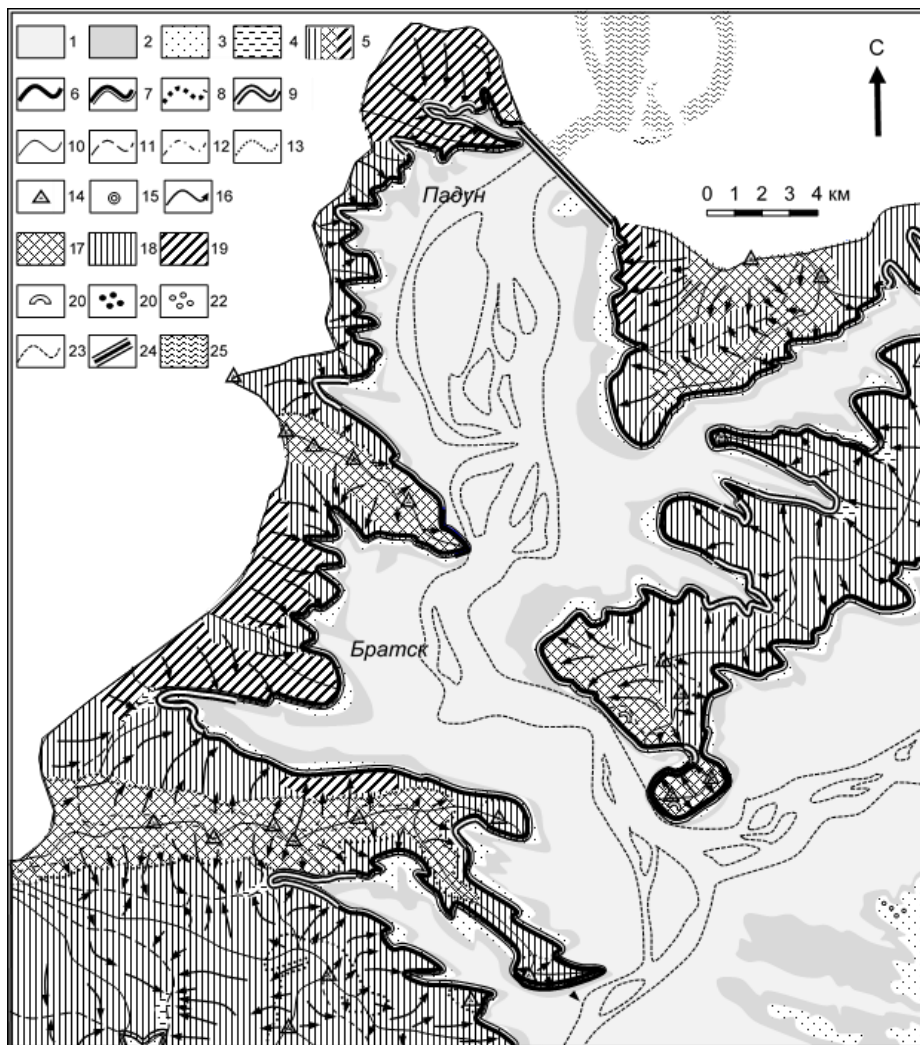
Грунты, слагающие береговые морфосистемы, являются важным инженерно-геологическим фактором, определяющим особенности их развития. Классификация по характеру геологического субстрата отражает осложняющие локальные особенности экзогенных геодинамических процессов. Поэтому на картах береговых морфосистем показаны следующие грунты: скальные (в том числе карстующиеся); связные дисперсные (глины и суглинки); несвязные дисперсные (аллювий, коллювий).

Региональные особенности развития береговых морфосистем обуславливаются влиянием климата и растительности. Основными типами ландшафтов, определяющими специфику динамики берегов на исследуемой территории, являются степные, лесные и антропогенные.

### Результаты исследований

В результате проведенных исследований была выполнена классификация береговых бассейновых и каскадных склоновых систем по морфотопологическим и морфодинамическим характеристикам на основе индикационных дешифровочных признаков, отражающихся на

космических снимках, отработано содержание морфосистемных карт и составлены авторские карты морфосистем зоны влияния каскада Ангарских водохранилищ, позволяющие организовать мониторинг их геологической среды и выполнить анализ их динамики. Представленные в качестве примера карты (рис. 2, 3)

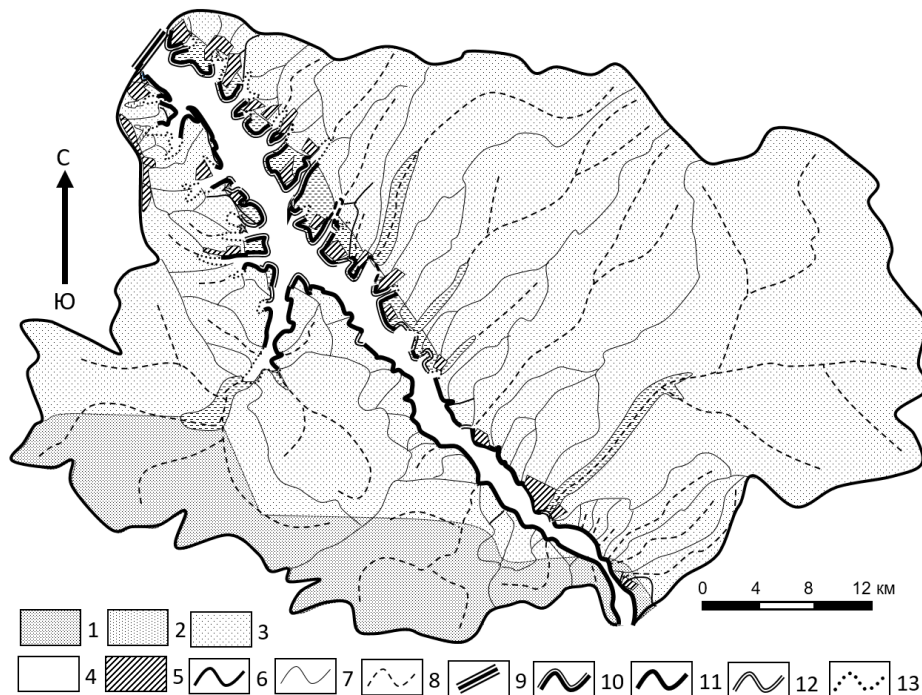


**Рис. 2. Морфосистемы участка Братского водохранилища:**

1–5 – зоны: 1 – вне воздействия волн, 2 – воздействия волн, 3 – осушки, 4 – влияния, 5 – береговых склонов; 6–9 – берега: 6 – абразионные, 7 – абразионно-аккумулятивные, 8 – аккумулятивные, 9 – стабильные; 10 – водоразделы; 11 – тальвеги; 12 – бровки; 13 – подошвы; 14 – вершины; 15 – донные точки; 16 – линии тока; 17–19 – грунты: 17 – скальные, 18 – полускальные, 19 – техногенные; 20 – оползни; 21 – карст; 22 – эоловые формы; 23 – затопленная береговая линия Ангары; 24 – плотина гидроэлектростанции; 25 – русло Ангары ниже плотины

**Fig. 2. Morphosystems of the Bratsk reservoir section:**

1–5 – zones: 1 – out of wave influence, 2 – wave influence, 3 – drying zone, 4 – influence zone, 5 – shore slopes; 6–9 – shores: 6 – abrasion, 7 – abrasion-accumulative, 8 – accumulative, 9 – stable; 10 – watershed; 11 – thalweg; 12 – edge; 13 – foot; 14 – top; 15 – bottom points; 16 – current lines; 17–19 – soils: 17 – rock, 18 – semi-rock, 19 – anthropogenic; 20 – landslide; 21 – karst; 22 – aeolian form; 23 – submerged Angara coastline; 24 – dam; 25 – Angara channel downstream



**Рис. 3. Морфосистемы Иркутского водохранилища:**

1–3 – грунты: 1 – скальные, 2 – полускальные, 3 – дисперсные; 4 – акватория;  
 5 – селитебные территории; 6 – главный водораздел; 7 – водоразделы второго порядка;  
 8 – тальвеги; 9 – плотина гидроэлектростанции; 10–13 – берега: 10 – абразионные,  
 11 – стабильные, 12 – аккумулятивные, 13 – ингрессионные

**Fig. 3. Morphosystems of the Irkutsk reservoir:**

1–3 – soils: 1 – rock, 2 – semi-rock, 3 – dispersion; 4 – water area;  
 5 – residential area; 6 – main watershed; 7 – watersheds of the second order;  
 8 – thalwegs; 9 – dam; 10–13 – shores: 10 – abrasion,  
 11 – stable, 12 – accumulative, 13 – ingressive

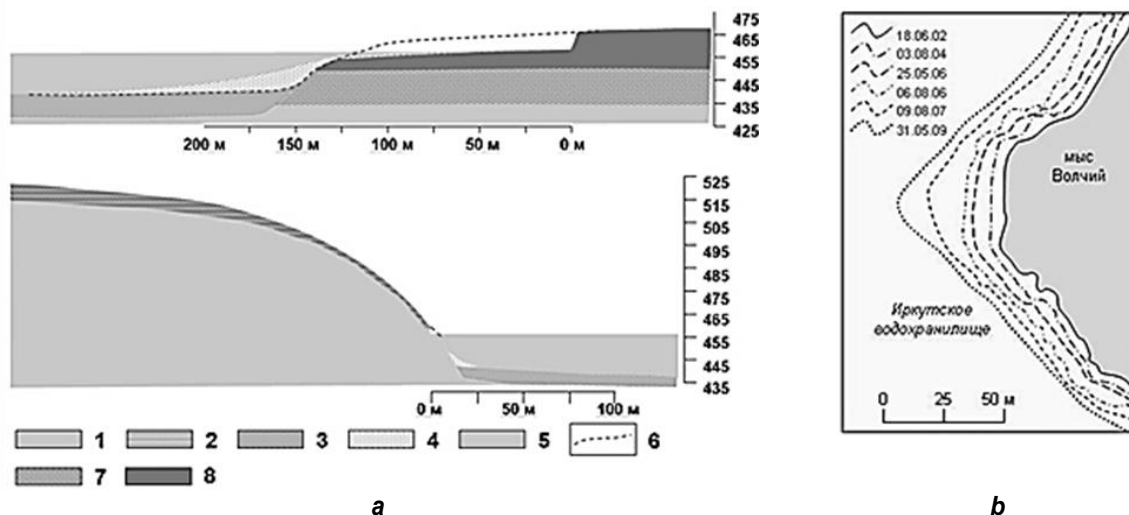
составлены по морфотопологическим признакам с учетом осложняющих факторов в соответствии с вышеизложенной концепцией [12,13].

Принцип морфодинамического анализа разных типов берегов рассмотрим на примере поперечных профилей эталонных участков, расположенных на противоположных берегах в нижней части Иркутского водохранилища (рис. 4, а). Простое сопоставление этих профилей показывает, что берег, сложенный слабыми грунтами, отступал со скоростью 2–3 м в год, а противоположный берег, сложенный прочными грунтами – со скоростями 2–3 см в год. Изменения береговых систем правого берега в плане хорошо видны также из сравнительного анализа положения береговой линии по разновременным космическим снимкам (рис. 4, б).

Важным результатом проведенных исследований стала разработка методики морфодинамического анализа изменений берегов водохранилищ. Для этого были выполнены ретроспективные исследования скорости разрушения берегов на эталонном участке Заярск, расположенном в нижней части Братского водохранилища на его правом затопленном берегу (рис. 5, а), и прогноз размыва на эталонном участке Тушама, расположенном в зоне затопления Богучанского водохранилища на левом берегу Ангары в районе с. Кеуль (рис. 5, б).

Заярский участок интересен тем, что на нем имеют место наиболее благоприятные для размыва берегов инженерно-геологические (грунты) и гидрометеорологические (волны и ветер) условия





**Рис. 4. Анализ береговых морфосистем Иркутского водохранилища:**

*a* – поперечные профили эталонных участков на противоположных берегах в нижней части Иркутского водохранилища; *b* – положения береговой линии по разновременным космическим снимкам 1–6 – профили берега (слева верху – правого, слева внизу – левого): 1 – полускальные грунты коренного берега, 2 – дисперсные грунты склоновых отложений, 3 – аллювий затопленной поймы Ангары, 4 – современные дисперсные абразионные отложения, 5 – водная масса, 6 – исходный профиль берега; 7–8 – отложения террасы Ангары: 7 – аллювиальные, 8 – делювиальные

**Fig. 4. Analysis of shoreline morphosystems of the Irkutsk reservoir:**

*a* – transverse profiles of model sites on the opposite shores, lower part of the Irkutsk reservoir;

*b* – position of the shoreline by non-simultaneous satellite images

1–6 – shore profiles (left top – right shore, left bottom – left shore): 1 – semi-rock soils of the bedrock shore, 2 – dispersed soils of slope sediments, 3 – alluvium of the flooded Angara bottomland,

4 – recent dispersed abrasion sediments, 5 – water, 6 – initial shore profile;

7–8 – deposits of the Angara terrace: 7 – alluvial, 8 – deluvial

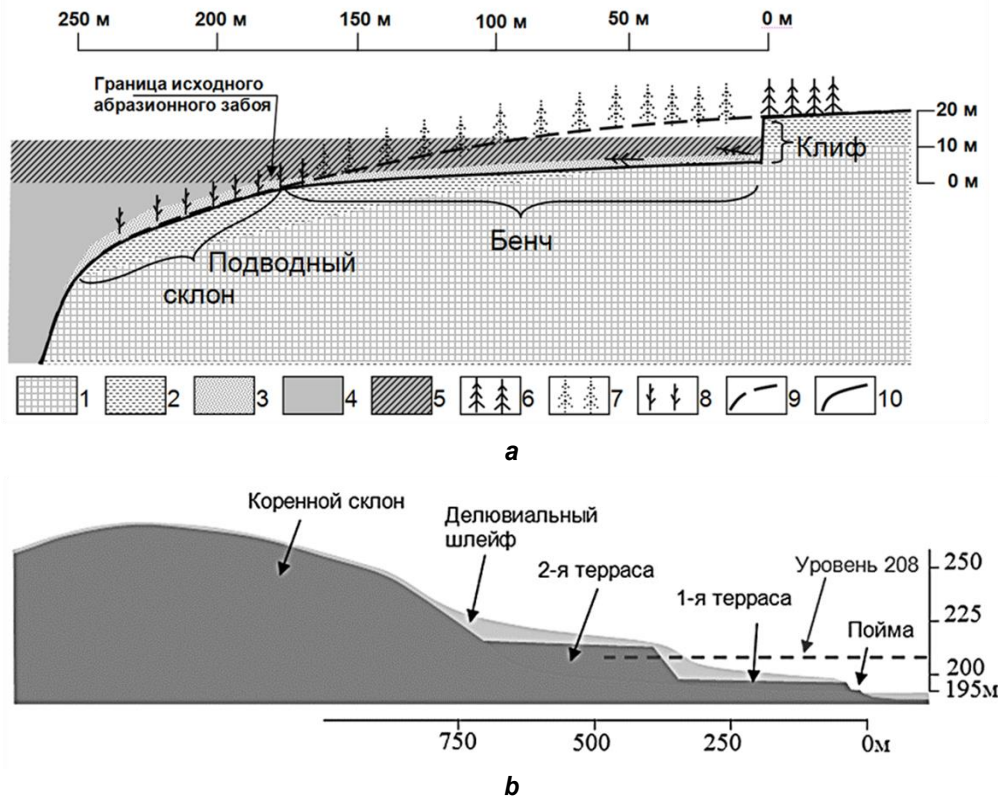
и отмечены самые большие величины размыва берегов по всему Ангарскому каскаду [2, 14]. Для анализа и количественной оценки величины размыва на этом участке был построен поперечный профиль измененного берега.

Средняя скорость размыва на рассматриваемом участке была получена путем деления ширины размывтой береговой полосы на время размыва и составила порядка 3–4 м в год, что является, по-видимому, одной из наивысших скоростей на всем каскаде ангарских водохранилищ.

Выполненная реконструкция скорости размыва на данном эталонном участке цифры была верифицирована и другими способами, а именно: путем анализа разновременных топографических и лоцманских карт и повторными геодезическими съемками [15].

Подобные работы были выполнены также по профилю эталонного участка Тушама, однако не в целях реконструкции произошедшего размыва, а в целях прогноза будущего размыва. Здесь при планируемом 13-метровом подъеме воды подтопываются террасы Ангары, сложенные слабыми дисперсными грунтами, что приведет к дисбалансу литодинамических обстановок берегов и их интенсивному размыву.

Сопоставляя эталонный Тушамский участок с аналогичными по морфологии и инженерно-геологическим условиям эталонными участками уже существующих водохранилищ, нетрудно предположить, что размыв берегов в его пределах составит 2–3 м в год и их отступление по причине достаточного удаления будущего уреза от коренных скальных пород (траппы) будет весьма интенсивным и составит несколько сотен метров.



**Рис. 5. Морфодинамический анализ береговых морфосистем:**

*a* – ретроспективный анализ размыва берегов Заярского полигона;

*b* – прогнозный анализ размыва зоны затопления Тушамского полигона

- 1 – полускальные грунты цоколя террасы Ангары; 2 – дисперсные грунты аллювия террасы Ангары и склоновых отложений; 3 – дисперсные грунты наносов водохранилища; 4 – минимальный уровень воды; 5 – максимальный уровень воды; 6 – сохранившиеся деревья; 7 – исчезнувшие деревья; 8 – затопленные деревья; 9 – берег до затопления; 10 – современный берег

**Fig. 5. Morphodynamic analysis of coastal morphosystems**

*a* – retrospective analysis of the shore erosion, Zayarsk model site;

*b* – prospective erosion analysis of the flooded area, Tushama model site

- 1 – semi-rock soils of the Angara terrace basement; 2 – dispersed soils of the alluvium Angara terrace and slope deposits; 3 – dispersed soils of reservoir sediments; 4 – minimal water level; 5 – maximal water level; 6 – survived trees; 7 – vanished trees; 8 – submerged trees; 9 – shore before submersion; 10 – current shore

В целом, обобщая результаты рассмотренного выше морфодинамического анализа, можно констатировать, что скорость размыва берегов, сложенных скальными грунтами, составляет несколько миллиметров в год, полускальными – несколько сантиметров в год, и дисперсными – несколько метров в год.

Следует также отметить, что интенсивность отступления берегов Ангарских водохранилищ сохранится и в обозримом будущем, поскольку морфологическая выраженность абразионного рельефа и

существующие скорости размыва пока не свидетельствуют о затухании этого процесса.

**Выводы**

Апробирование данных исследований показало, что геоинформационное картографирование зоны влияния водохранилищ на основе концепции морфосистем с использованием материалов дистанционного зондирования Земли может решить следующие вопросы: обеспечение создания специализированной картографической основы для организа-

ции и ведения оперативного мониторинга геологической среды крупных водохранилищ; выполнение морфодинамического

анализа береговых морфосистем, определение скорости разрушения берегов в прошлом, настоящем и будущем.

#### Библиографический список

1. Братское водохранилище. Инженерная геология территории / отв. ред. М.М. Одинцов. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 275 с.

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

3. Безруков Л.А., Густокашина Н.Н., Никольский А.Ф., Балыбина А.С. Воздействие Ангарского каскада ГЭС и водохранилищ на климат, хозяйство и население Иркутской области // Проблемы комплексного использования водных ресурсов ангарских водохранилищ: материалы IV науч.-метод. семинара. М., 2000. С. 69–80.

4. Дьяконов К.Н. Влияние крупных равнинных водохранилищ на леса прибрежной зоны. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 127 с.

5. Кусковский В.С., Маслов В.М., Тржцинский Ю.Б. Проблемы рационального использования береговой зоны Ангаро-Енисейских водохранилищ // Инженерная геология. 1991. № 3. С. 45–53.

6. Кусковский В.С., Овчинников Г.И., Павлов С.Х., Тржцинский Ю.Б., Орехова Е.С., Козырева Е.А. Экологические изменения геологической среды под влиянием крупных водохранилищ Сибири // Сибирский экологический журнал. 2000. № 2. С. 135–148.

7. Межеловский Н.В., Рамм Н.С., Шварев В.В. Аэрокосмический мониторинг геологической среды. М.: Знание, 1988. 64 с.

8. Пластинин Л.А., Гиенко А.Я., Ступин В.П., Олзоев Б.Н., Коптев А.В. Проблемы методологических и методических разработок

регионального мониторинга и экологического прогноза на примере водохранилищ Ангарского каскада // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2010. № 5. С. 105–110.

9. Гиенко А.Я., Гиенко Г.А. Космический мониторинг зоны влияния Богучанской ГЭС на Ангаре. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 164 с.

10. Пластинин Л.А., Ступин В.П. Картографо-космический мониторинг зоны воздействия водохранилищ Ангарского каскада: монография. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2018. 188 с.

11. Ласточкин А.Н. Морфодинамический анализ. Л.: Недра, 1987. 256 с.

12. Ступин В.П. Картографирование морфосистем: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. 160 с.

13. Ступин В.П., Пластинин Л.А. Морфодинамическое картографирование типов берегов ангарских водохранилищ по материалам дистанционного зондирования Земли // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 9 (56). С. 72–78.

14. Литвин В.М., Сараева Е.П., Баженова Н.Н. Оценка интенсивности экзогенных геологических процессов зоны влияния Братского водохранилища // Гидрогеология и инженерная геология Сибири. Новосибирск: Наука, 1990. С. 46–64.

15. Ступин В.П., Кононенко А.В., Пластинин Л.А. Геодезический и картографо-морфодинамический методы в изучении динамики берегов Братского водохранилища // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 12 (71). С. 77–81.

#### References

1. Odintsov M.M. *Bratskoe vodokhranilishche. Inzhenernaya geologiya territorii* [Bratsk water reservoir. Engineering geology of the territory]. Moscow: ASUSSR Publ., 1963, 275 p. (In Russ.).

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

3. Bezrukov L.A., Gustokashina N.N., Nikol'skii A.F., Balybina A.S. *Vozdeistvie Angarskogo kaskada GES i vodokhranilishch na klimat, khozyaistvo i naselenie Irkutskoi oblasti* [The Angara hydropower cascade and reservoirs influence on climate, economy and population of Irkutsk region].

*Materialy IV nauch.-metod. seminara "Problemy kompleksnogo ispol'zovaniya vodnykh resursov angarskikh vodokhranilishch"* [Materials of the 4<sup>th</sup> research-and-methodology seminar "Multi-purpose use of water resources of the Angara reservoirs"]. Moscow, 2000, pp. 69–80. (In Russ.).

4. D'yakonov K.N. *Vliyanie krupnykh ravninykh vodokhranilishch na lesa pribrezhnoi zony* [Influence of flat-bottomed water reservoirs on near-shore forests]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1975, 127 p. (In Russ.).

5. Kuskovskii V.S., Maslov V.M., Trzhtsin'skii Yu.B. Rational use of Angara-Yenisey water reservoirs' shores. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering Geology World], 1991, no. 3, pp. 45–53. (In Russ.).

6. Kuskovskii V.S., Ovchinnikov G.I., Pavlov S.Kh., Trzhtsinskii Yu.B., Orekhova E.S., Kozyreva E.A. Ecological changes of geological environment under the influence of large reservoirs of Siberia. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2000, no. 2, pp. 135–148. (In Russ.).

7. Mezhelovskii N.V., Ramm N.S., Shvarev V.V. *Aerokosmicheskii monitoring geologicheskoi sredy* [Aerospace monitoring of geological environment]. Moscow: Znanie Publ., 1988, 64 p. (In Russ.).

8. Plastinin L.A., Gienko A.Ya., Stupin V.P., Olzoev B.N., Koptev A.V. Problems of methodological developments in regional monitoring and environmental forecasting: Angara cascade case. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2010, no. 5, pp. 105–110. (In Russ.).

9. Gienko A.Ya., Stupin V.P., Gienko G.A. *Kosmicheskii monitoring zony vliyaniya Boguchanskoi GES na Angare* [Space monitoring of the influence zone of Boguchansk hydropower station, Angara river]. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2006, 164 p. (In Russ.).

10. Plastinin L.A., Stupin V.P. *Kartografo-kosmicheskii monitoring zony vozdeistviya vodokhranilishch Angarskogo kaskada* [Cartographic-space monitoring of the influence zone of the Angara water reservoir cascade]. Irkutsk: Irkutsk

National Research Technical University Publ., 2018, 188 p. (In Russ.).

11. Lastochkin A.N. *Morfodinamicheskii analiz* [Morphodynamic analysis]. Leningrad: Nedra Publ., 1987, 256 p. (In Russ.).

12. Stupin V.P. *Kartografirovaniye morfosistem* [Morphosystems mapping]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2009, 160 p. (In Russ.).

13. Stupin V.P., Plastinin L.A. Morphodynamic mapping of types of Angara reservoir shores by earth remote sensing data. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2011, no. 9 (56), pp. 72–78. (In Russ.).

14. Litvin V.M., Saraeva E.P., Bazhenova N.N. *Otsenka intensivnosti ekzogennykh geologicheskikh protsessov zony vliyaniya Bratskogo vodokhranilishcha* [Evaluating the intensity of exogenous geological processes in Bratsk water reservoir influence zone]. *Gidrogeologiya i inzhenernaya geologiya Sibiri* [Hydrogeology and engineering geology of Siberia]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1990, pp. 46–64. (In Russ.).

15. Stupin V.P., Kononenko A.V., Plastinin L.A. Geodetic, cartographic and morphodynamic methods in studying Bratsk reservoir banks dynamics. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2012, no. 12 (71), pp. 77–81. (In Russ.).

#### Критерии авторства / Authorship criteria

Ступин В.П. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Vladimir P. Stupin is the author of the article, holds the copyright and bears the responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of the article.

#### Сведения об авторе / Information about the author



##### Ступин Владимир Павлович,

доктор технических наук,  
профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: Stupinigu@mail.ru

##### Vladimir P. Stupin,

Dr. Sci. (Eng.),  
professor at Mine Surveying and Geodesy Department,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
e-mail: Stupinigu@mail.ru