

## Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-2-77-86>

УДК 626.8:528.77:627.5



# МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ БЕРЕГА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОТИВОЭРОЗИОННОГО БЕРЕГОУКРЕПЛЕНИЯ

К.С. Семёнова<sup>✉</sup>, О.Н. Черных

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

**Аннотация.** Цель работы – обосновать методику мониторинга эрозионного состояния прибрежной зоны водных объектов с использованием данных дистанционного зондирования и предложить берегоукрепительные мероприятия, обеспечивающие противоэрозионную защиту. Для мониторинга развития эрозии берега предложена методика, базирующаяся на построении топографической карты рельефа, расчетов водного *WRI* и вегетационного *NDVI* индексов, полученных на основании анализа данных дистанционного зондирования. Карта индекса *WRI*, совмещенная с топографической картой местности, позволяет определить направление стока, а охарактеризовать устойчивость откосов за счет оценки густоты развития растительности позволяет вегетационный индекс *NDVI*. При выполнении анализа двух карт можно выделить эрозионные участки. Алгоритм мониторинга развития эрозии береговой линии по результатам обработки спутниковых снимков апробирован при формировании туристического кластера «Конаково-агротуризм». Выявленные эрозионные участки на построенных картах подтверждены результатами натурных наблюдений и фотофиксацией состояния берега р. Волга Конаковского района РФ.

**Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-29-00928; <https://rscf.ru/project/23-29-00928/>**

**Ключевые слова:** эрозия, берег, дешифрование, вегетационный индекс, водный индекс, агротуризм, берегоукрепление

**Формат цитирования:** Семёнова К.С., Черных О.Н. Мониторинг состояния берега водных объектов с использованием данных дистанционного зондирования и организация противоэрозионного берегоукрепления // Природообустройство. 2025. № 2. С. 77-86. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-2-77-86>

Original article

# MONITORING OF THE STATE OF THE COAST OF WATER BODIES USING REMOTE SENSING DATA AND ORGANIZATION OF ANTI-EROSION COASTAL PROTECTION

K.S. Semenova<sup>✉</sup>, O.N. Chernykh

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia

**Abstract.** The purpose of the work is to substantiate the methodology for monitoring the erosion state of the coastal zone of water bodies using remote sensing data and to propose coastal protection measures that ensure anti-erosion protection. To monitor the development of coastal erosion, a methodology is proposed based on the construction of a topographic relief map and calculations of the water *WRI* and vegetation *NDVI* indices obtained from the analysis of remote sensing data. The *WRI* index map, combined with a topographic map of the area, allows you to determine the direction of runoff, and the vegetation index *NDVI* allows you to characterize the stability of slopes by assessing the density of vegetation development.

When analyzing two maps, erosion areas can be identified. The algorithm for monitoring the development of coastal erosion based on the results of satellite imagery processing was tested during the formation of the Konakovo-Agrotourism tourist cluster. The erosion areas identified on the constructed maps are confirmed by the results of in-kind observations and photo recording of the state of the banks of the Volga River in the Konakovo District of the Russian Federation.

**This work was funded by a grant from the Russian Science Foundation No 23-29-00928, <https://rscf.ru/project/23-29-00928/>**

**Keywords:** erosion, coast, deciphering, vegetation index, water index, agrotourism, bank protection

**Format of citation:** Semenova K.S., Chernykh O.N. Monitoring of the state of the coast of water bodies using remote sensing data and organization of anti-erosion coastal protection // Prirodoobustroystvo. 2025. No. 2. P. 77-86. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-2-77-86>

**Введение.** На формирование геометрии береговой линии рек влияют такие процессы, как эрозия, суффозия, абразия, оползни, а также сезонное, годовое изменение стока рек и его регулирование человеком. Вероятность возникновения эрозии на поверхности земли определяют как природные факторы (климат, уклон территории, физико-механический состав почвы, растительность), так и хозяйственное использование земель. Водная эрозия, под которой обычно понимают процесс разрушения горных пород и почв водным потоком, часто возникает благодаря поверхностному стоку при интенсивных обильных осадках на обрывистых и крутых склонах территории АПК, увлажняющих поверхность почвы, снижающих сцепление ее агрегатов и способствующих медленному сползанию частиц почвы по склону.

Рядом исследователей выявлена большая пространственная и временная изменчивость величины объема смещенного эрозионного материала по склонам с разреженным растительным покровом при выпадении осадков [1], зависящая от крутизны склонов для сравнительно малых углов их наклона. Помимо водной и ветровой эрозии, на состояние земельных прибрежных участков реки влияет речная эрозия, разрушающая прибрежную зону в результате воздействия речного потока. Ее параметры зависят от прочности грунта основания, интенсивности водного потока, гидрологических сезонов, деятельности человека (судоходство, сброс воды в реку и пр.) [2, 3].

Одной из основных причин развития водной эрозии на поверхности земли является увлажнение почвы, зависящей от ее физико-химических свойств, впитывающей способности, влагоемкости и водопроницаемости, а также видового состава растительности и развитой корневой системы, способной противостоять водной эрозии.

Процесс развития эрозии сложно обнаружить и выявить преобладающие причины ее возникновения в связи с множеством факторов,

влияющих на нее. В настоящее время для мониторинга состояния различных сельскохозяйственных объектов используются данные дистанционного зондирования земли. Его применение позволяет оперативно исследовать динамику протекания природных процессов и явлений, помогает анализировать причины их возникновения, прогнозировать возможные последствия [4, 6].

**Цель исследований:** обоснование прогностической методики мониторинга эрозионного состояния прибрежной зоны водных объектов с использованием данных дистанционного зондирования, а также выработка предложений по проведению берегоукрепительных мероприятий, обеспечивающих противоэрозионную защиту локального участка береговой линии, используемого для рекреации.

Актуальность темы исследований подтверждает включение отдельным блоком понятия агротуризма в нацпроект «Туризм и индустрия гостеприимства».

**Материалы и методы исследований.** В Конаковском районе Тверской области, в 140 км от Москвы, 70 км от Твери, в зоне влияния Иваньковского водохранилища реализуется уникальный туристический проект «Конаково-агротуризм», аутентичный для центра России. Иваньковское водохранилище (Московское море) играет важнейшую роль в формировании качества воды Волжского источника водоснабжения столицы, являясь самым верхним в Волжском каскаде, с помощью которого осуществляется сезонное регулирование стока для обеспечения водой канала им. Москвы [7]. При заполнении водохранилища, глубина которого составляет от 4 до 19 м, в 1936-1937 гг. была затоплена территория площадью 32 тыс. га, которую занимали 106 населенных пунктов, и уничтожен уездный город Корчева (первое упоминание – в 1540-е гг.). Сегодня длина береговой линии водохранилища составляет 527 км, площадь – 327 км<sup>2</sup>, площадь водоохранной зоны – 650 км<sup>2</sup>.

Основная составляющая приходной части водного баланса водохранилища – поверхностный сток (97%). Из общего притока на долю р. Волги приходится 59%, р. Тверца – 24%, р. Шошы и других притоков – 17%. На территории района, расположенного на пониженной равнине и отличающегося большой сглаженностью моренных форм, рельеф достаточно однороден [8]. Здесь в основном развиты подзолистые и болотные почвы, растительность представлена смешанными и хвойными лесами, луговыми и болотными травами, сфагновыми мхами.

В рамках кластера в агротуристическое пространство «Топорок» входит пристань (рис. 1а), близ которой возводится из модульных домов с использованием натурального бруса кемпинг-отель. В будущем планируется строительство палаточного лагеря, гостиницы, ресторана, создание экотропы, велосипедных дорожек, спортивных, детских и пляжных зон и многих других объектов рекреации. В сентябре 2024 г. были проведены обследования берега Волги в хозяйстве АО Корчева, где за навигационный период уровень воды снижается на 0,4...0,5 м. В период половодья уровень может значительно изменяться (по данным станции г. Дубна, на 1,95 м в среднем за 4 года).

В период подготовки к обследованию на основании анализа существующих методов было предложено в качестве исходных данных для мониторинга эрозионных участков береговых зон кластера использовать наиболее качественные

снимки со спутников Landsat 7 и Landsat 8 [4, 5]. Снимки Landsat находятся в открытом доступе на сайте NASA earthexplorer, доступны в открытых каталогах и каталогах управляющих организаций. При расчете индексов для разных спутников необходимо учитывать номер канала и его соответствие определенному спектральному диапазону [6]. Например, принято, что зеленый спектр у Landsat 7 соответствует каналу 2, а у Landsat 8 – каналу 3. В основе дешифрирования снимков спутников лежит процесс распознавания объектов, их свойств. При этом каждому пикселю изображения спутника соответствует набор значений спектральных признаков, характеризующих объект.

Спектральная характеристика почв определяется физико-химическими свойствами, влажностью, растительным покровом, рельефом и пр. Для определения влажности почвы необходим индивидуальный подбор комбинации спектральных каналов, характеризующийся различной отражательной способностью увлажненных открытых участков земли и почв под растительностью. Густозалесенные массивы легче выявить с помощью использования каналов NIR-RED. Спектральные признаки SWIR-диапазона характеризуются наибольшей чувствительностью к изменениям растительного покрова в зависимости от влияния негативных факторов – таких, как деградация почв, недостаток влаги, заболевание растений. Для построения карты рельефа

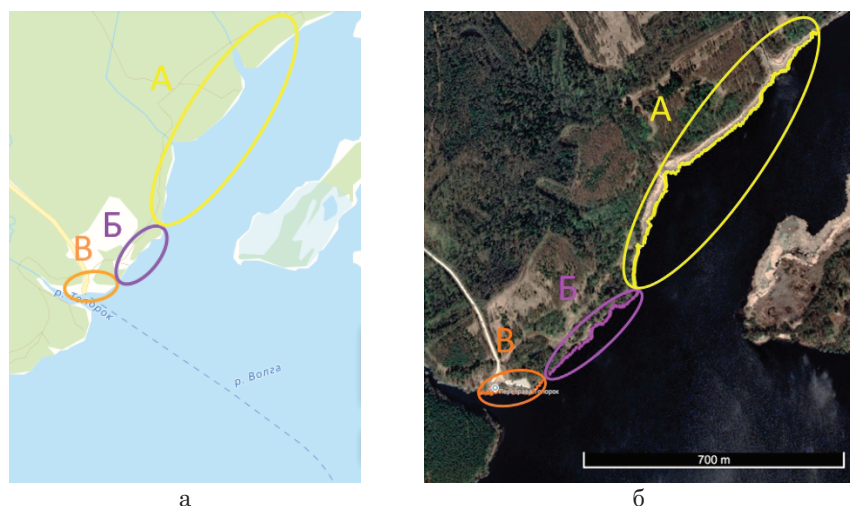


Рис. 1. Обследованный участок береговой линии р. Волги, обустраиваемый для реализации туристического кластера «Конаково-агротуризм»:

а – карта объединенного агротуристического пространства; б – предлагаемое зонирование берега;

А – пляжная зона (желтая линия); Б – зона рядом с постройками (фиолетовая линия);

В – зона пристани (оранжевая линия)

Fig. 1. Surveyed section of the Volga River coastline, being developed for the implementation of the Konakovo-Agrotourism tourist cluster:

а – map of the combined agrotourism space; б – proposed zoning of the coast;

А – beach area (yellow line); Б – area near buildings (purple line); В – pier area (orange line)



территории в программе QGIS использовались топографические данные Земли Open Topography, полученные как с помощью лидара, так и более классическими методами, которые поддаются алгоритму интерполяции TIN (триангулированная нерегулярная сеть). Выбор базы данных был основан на высокой точности, отсутствии искажений в результате облачности и постоянном обновлении данных дистанционного зондирования. В результате обработки сведений была получена топографическая карта местности, согласно которой высота рельефа Конаковского района изменяется от 125 до 160 м.

Увлажненность поверхности земли и содержание влаги в растительном покрове можно достаточно корректно определить с помощью водного индекса *WRI* (Water Ratio Index) [6], который рассчитывается по формуле:

$$WRI = (Green + Red) / (NIR + SWIR2), \quad (2)$$

где *Green* – отражение в области зеленого цвета видимого спектра; *Red* – отражение в области красного цвета видимого спектра; *NIR* – отражение в ближней инфракрасной области спектра; *SWIR2* – отражение в ближней инфракрасной коротковолновой области спектра.

Для оценки растительного покрова изучаемой территории был рассчитан вегетационный индекс *NDVI*, который дает достаточно точное представление о степени залесенности прибрежной зоны: чем темнее цвет, тем гуще лесной массив, тем меньше участок подвержен водной и ветровой эрозии. Это дает возможность при регулярном обследовании береговой зоны проводить картирование растительного покрова, определять площадь и плотность растений [9, 10]:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red). \quad (3)$$

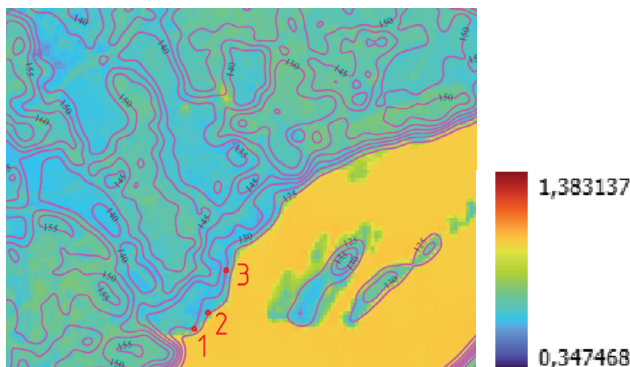


Рис. 2. Карта водного индекса *WRI* и рельефа местности части кластера с указанием точек фотофиксации во время натурного обследования берега Волги  
Fig. 2. Map of the water index *WRI* and area relief of part of the cluster with indication of photo fixation points during the field survey of the Volga bank

**Результаты и их обсуждение.** Полученная при расчете водного индекса *WRI* карта дает достаточно четкие границы увлажнения поверхности земли и накопления влаги в растениях. Влажность поверхности земли изменяется в пределах от 0,3 до 1, водные объекты имеют значение от 1 и выше. При совмещении карты водного индекса *WRI*, топографической карты местности (рис. 2) и направления уклона было определено формирование стока на обустраиваемом участке кластера, указанное разными оттенками синего цвета. Таким образом, объединенную карту водного индекса *WRI* и рельефа местности можно использовать для выявления эрозионных участков.

Вегетационный индекс *NDVI* характеризует относительное количество фотосинтетически активной биомассы. Он является комбинированной характеристикой плотности растительного покрова по содержанию хлорофилла (чем темнее цвет, тем гуще растительность) (рис. 3). Желтым и светло-зеленым цветом обычно обозначаются, соответственно, участки, безлесные и заросшие кустарниками (табл. 1). Таким образом, вегетационный индекс позволяет охарактеризовать устойчивость откосов береговой линии за счет оценки густоты развития леса. Самыми устойчивыми откосами считаются те, у которых вершина и склон закреплены лесным массивом (стрелка 2 на рис. 3). На таких участках не требуется оперативное строительство противоэрозионных сооружений. Участок под стрелкой 1 и зона близ стрелки без густой растительности требуют проведения обязательных мероприятий противоэрозионной защиты. На рисунке 3 прослеживается углубление береговой линии в сторону суши, лес при этом сменяется кустарником. Резкое смещение береговой линии в глубь суши рядом с точкой 1, переувлажнение земли и наличие кустарниковой растительности характеризуют участок как эрозионно-опасный.

Обследование прибрежной зоны проводилось в сентябре 2024 г. на участке левого берега Волги длиной 1807,7 м. Участок был условно разделен на 3 зоны (рис. 1б): пляжная зона (А), зона рядом с постройками (Б), зона пристани (В). При оценке эрозии берега анализировалось состояние элементов всей цепочки «Водосбор-склон-русло реки», поскольку здесь экзогенные процессы развиваются взаимосвязанно.

Во время натурных обследований было установлено, что в начале маршрута (рис. 2) рядом с точкой 1 сейчас располагается пристань, и от нее идет автомобильная дорога. Здесь часть берега заросла осокой. У пристани

Таблица 1. Классификация данных дистанционного зондирования по вегетационному индексу *NDVI*

Table 1. Classification of remote sensing data by *NDVI* vegetation index

| № | Точки выборки / <i>Sampling points</i>                                             | Особенности изображения / <i>Features of imagery</i>                               | <i>NDVI</i>                                                         |
|---|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1 | <b>Застройка</b><br><i>Buildings development</i>                                   |  | <b>Резкое изменение значений</b><br><i>Drastic change in values</i> |
| 2 | <b>Водные объекты</b> / <i>Water objects</i>                                       |  | –0,1-0                                                              |
| 3 | <b>Лесные угодья</b> / <i>Forest land</i>                                          |  | 0,175-0,43                                                          |
| 4 | <b>Сельскохозяйственные угодья</b> / <i>Agricultural land</i>                      |  | >0,43                                                               |
| 5 | <b>Почва с незначительной растительностью</b><br><i>Soil with minor vegetation</i> |  | 0,07-0,175                                                          |



Рис. 3. Объединенная карта рельефа агротуристического пространства «Топорок» с вегетационным индексом *NDVI* и с указанием направления стока:

- 1 – участок с низкой степенью заселенности;  
2 – участок с высокой степенью заселенности

Fig. 3. Combined relief map of the agrotourism space “Toporok” with the vegetation index *NDVI* and with the indication of the flow direction:

- 1 – area with a low degree of population;  
2 – area with a high degree of population

на неукрепленных безлесных участках по направлению, отмеченному на рисунке 4 стрелкой, наблюдается эрозия разной интенсивности. Рядом, вдоль берега до точки 2 маршрута, на момент обследования была организована строительная площадка, местами располагаются коттеджные домики, вырыт пруд. В районе точки 2 вдоль площадки на берегу по направлению стока встречаются участки с эрозией поверхности земли. В точке 3 территория уже более залесенная. Пляжный берег в зоне точки 3 покрыт разнотравьем, осока растет у самой кромки воды. По всей длине берега встречается струйчатая эрозия глубиной до 10 см, особенно интенсивная близ территории стройки. Неглубокие, редко встречающиеся эрозионные

участки есть и на пляжах, и на береговой линии близ лесного массива (рис. 4). К основным факторам, влияющим на эрозию береговой линии, как и для остальных участков левобережья, можно отнести антропогенную нагрузку и проявление русловых процессов, от которых и зависит степень устойчивости.

Таким образом, полученная карта (рис. 2) согласно данным полевого обследования достоверно указывает эрозионно-опасные участки в прибрежной зоне, а также позволяет уточнить участки с открытой поверхностью земли, без растений, то есть эрозионно-опасные.

Для оценки состояния эрозии берега при обработке результатов обследования использовался критерий интенсивности смыва поверхности земли берега [11]. Он определялся как отношение массы смытых частиц грунта к площади участка. Масса смытой земли находилась при этом как произведение ее объема на плотность сложения. Согласно полученным результатам, приведенным в таблице 2, интенсивность смыва поверхности земли берега в пляжной зоне и зоне пристани можно было оценить на момент обследования как «очень слабая». В зоне стройки эрозия берега ожидаемо усиливается, но на данный момент смыв является довольно слабым.

Поскольку береговая зона, где возводится инновационный комплекс агротуристического пространства «Топорок», подвержена эрозионным процессам и не укреплена инженерными защитными сооружениями, с каждым годом при активном ее использовании будет все интенсивнее происходить деформация берега, что впоследствии может привести к разрушению всех основных построек инфраструктуры и туристического кластера «Конаково-агротуризм» в целом.



Для повышения устойчивости береговой линии и защиты склонов от эрозии были рассмотрены, в соответствии с ожидаемым использованием прибрежных зон и с учетом инженерно-геологических и гидрологических условий береговой полосы, три основных типа противоэрозионных берегоукреплений: из природного камня, габионных конструктивных элементов и свай (деревянных из лиственницы либо ПВХ) [12-15].

При выборе и расчете параметров укрепления учитывались не только местные условия, но и то, что в водохранилище уровень воды зимой резко не изменяется, но может наблюдаться вымораживание отдельных элементов некоторых видов берегоукрепления. В теплый же период года берегоукрепительные конструкции подвержены размывам, в том числе ливнями, зарастанием сорной растительностью и пр.

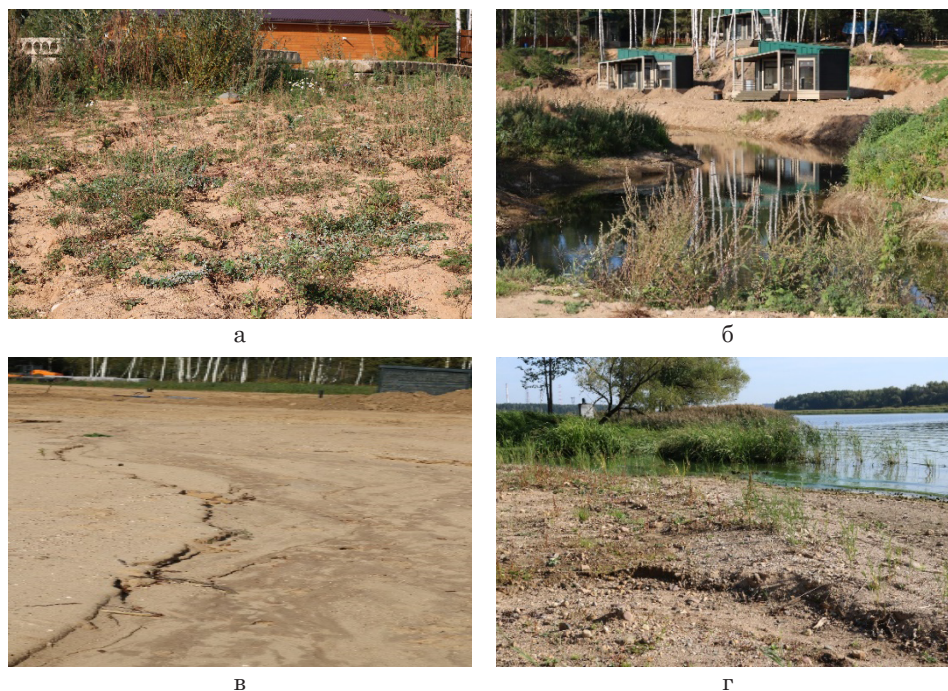


Рис. 4. Результаты обследования береговой линии р. Волги в Конаковском хозяйстве АО Корчева, сентябрь 2024 г., с обнаруженными дефектами: а – деформации прибрежной зоны в точке 1; б – переработка берега на участке между точками 1 и 2; в – продольная трещина в результате оползания берега в точке 2; г – эрозия берега в точке 3 (фото К.С. Семёнова)

Fig. 4. Results of the survey of the Volga River coastline in the Konakovo farm of JSC Korcheva, September 2024 with detected defects (photo by K.S. Semenova):

a – coastal zone deformations at point 1; б – coastal reworking in the area between points 1 and 2; в – longitudinal crack as a result of coastal landslide at point 2; г – coastal erosion at point 3

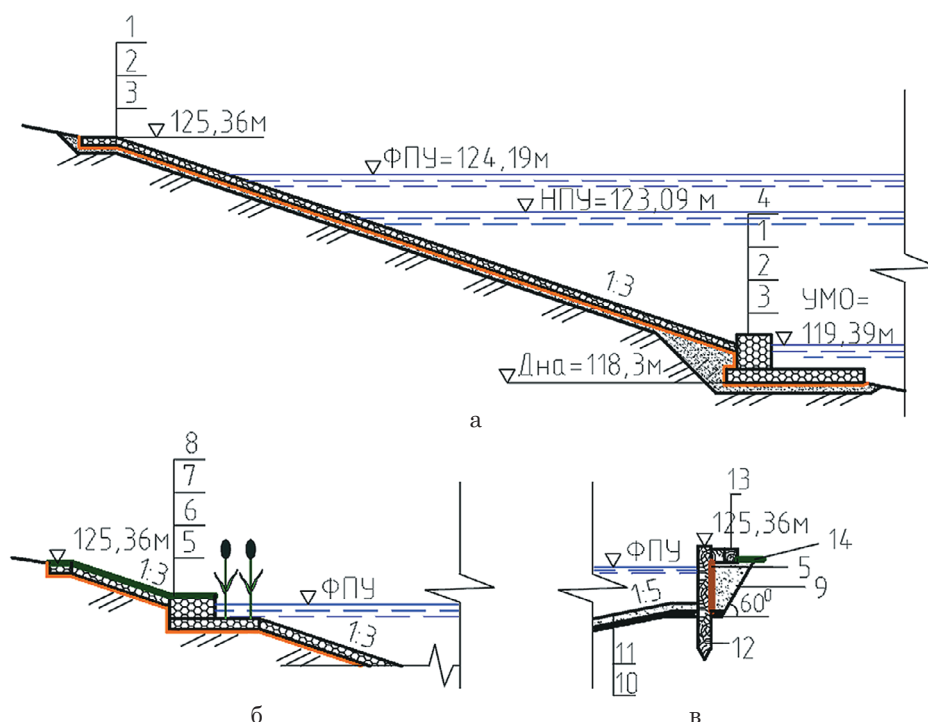
Таблица 2. Определение интенсивности смыва поверхности берега р. Волги

Table 2. Determination of the surface washing intensity of the Volga River bank

| Зона / The zone | Элементы рельефа<br>Elements of relief         | Длина зоны, м<br>Length of the zone, m | Площадь зоны, м <sup>2</sup><br>Area of the zone, m <sup>2</sup> | Плотность сложения, т/м <sup>3</sup><br>Addition density, t / m <sup>3</sup> | Средняя глубина эрозии, м<br>Average depth of erosion, m | Длина эрозии, м<br>Erosion length, m | Средняя ширина эрозии, м<br>Average width of erosion, m | Масса смыва земли, т<br>Mass of earth washout, t | Интенсивность смыва, т/га в год<br>The intensity of washing away of the land surface of the coast, t / ha per year |
|-----------------|------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| А               | пляжная зона<br>beach zone                     | 1198                                   | 8382                                                             | 1,52                                                                         | 0,025                                                    | 11,2                                 | 0,3                                                     | 0,128                                            | 0,15                                                                                                               |
| Б               | зона рядом с постройкой<br>zone near buildings | 384,0                                  | 1564,33                                                          | 1,53                                                                         | 0,08                                                     | 15,0                                 | 0,21                                                    | 0,386                                            | 2,63                                                                                                               |
| В               | зона пристани<br>pier zone                     | 225,7                                  | 261, 57                                                          | 1,48                                                                         | 0,05                                                     | 6,1                                  | 0,07                                                    | 0,032                                            | 1,21                                                                                                               |

Для зоны А (пляжная) практически не требуется дополнительное укрепление, так как верхняя часть прибрежного склона защищена густым лесом, нижняя часть (подводная) обладает пологостью, соответствующей устойчивым песчаным пляжным склонам [2]. Для закрепления берега в зоне Б (постройки кемпинг-отеля) предлагается: применение берегоукрепления из миксированных габионных конструкций с биоплато или использование типизированных укреплений из габионов (габионные матрасы и тюфяки [13, 14]; коробчатые и цилиндрические габионы [14, 15]; армирующие системы;

биоинженерные системы [16] и пр.). Неплохо они показали себя на низких, подмываемых берегах, возводимых компаниями «Габионы Маккаферри СНГ», «Реконструкция», «Габиком», «Берег» и др., как отдельно, так и в комбинации с геосинтетическими или геокомпозитными материалами (георешетки, геомембраны, геоматы, бентоматы, геотубы и т.д.) (рис. 5б). Для предлагаемой базовой конструктивной схемы из габионных элементов (рис. 5а) был составлен алгоритм расчета берегоукреплений, заключающийся: в правильном выборе проектных данных (размера камня, параметров габионных структур – толщины матраса,



**Рис. 5. Схемы фрагментов предлагаемых берегозащитных противозерозийных конструктивных устройств агрокластера «Конаково-агротуризм» для различных зон берега Волги:**

а – оптимизированное крепление габионными структурами;

б – миксированные габионные конструкции с биоплато;

в – шпунтовая стенка из деревянных свай с геотекстилем

(1 – матрасно-тюфячные габионы  $2 \times 4 \times 0,23$  м; 2 – геотекстиль; 3 – песчаная подготовка 0,15 м;

4 – коробчатый габион  $1 \times 1 \times 2$  м; 5 – Дорнит 0,01 м; 6 – матрасы Рено  $3 \times 2 \times 0,23$  м;

7 – габионы  $2 \times 1 \times 0,5$  м; 8 – озеленение по слою растительного грунта; 9 – засыпка песком;

10, 11 – крупный речной песок на подготовке из геосинтетики; 12 – бревно из лиственницы;

13 – спилы из бревен лиственницы; 14 – посев трав по слою растительной смеси

и материала Макмат-L, закрепленного на откосе деревянными колышками

в шахматном порядке с шагом 0,5 м)

**Fig. 5. Schemes of fragments of the proposed coastal protection anti-erosion structural devices of the agrocluster “Konakovo-Agrotourism” for different zones of the Volga bank:**

a – optimized fastening with gabion structures; b – mixed gabion structures with a bioplateau;

c – sheet piling wall made of wooden piles with geotextile: 1 – mattress-mattress gabions  $2 \times 4 \times 0.23$  m;

2 – geotextile; 3 – sand preparation 0.15 m; 4 – box gabion  $1 \times 1 \times 2$  m; 5 – Dornit 0.01 m;

6 – Reno mattresses  $3 \times 2 \times 0.23$  m; 7 – gabions  $2 \times 1 \times 0.5$  m; 8 – landscaping on a layer of topsoil; 9 – sand backfill;

10, 11 – coarse river sand on geosynthetic preparation; 12 – larch log; 13 – larch log cuts;

14 – grass seeding on a layer of plant mixture and Makmat-L material, fixed on the slope with wooden pegs in a checkerboard pattern with a step of 0.5 m

длины и ширины элементов, типа сетки и проволки, заполнителя), величины касательных напряжений; в проверке на возможность появления деформаций; в проверке на размыв скорости под матрасами на границе габион-грунт.

Предварительные расчеты для оптимизации предлагаемых конструктивных решений были выполнены при следующих граничных условиях, учитывающих влияние Иваньковского водохранилища: ФПУ = 124,19 м; НПУ = 123,09 м; УМО = 119,39 м; скорость ветра  $V$  (на высоте 10 м) – 20, 14 и 5 м/с соответственно; устойчивая ширина акватории  $L = 1444$  км при угле между осью водоема и направлением ветра =  $0^\circ$ ; наибольшее заложение откосов береговой линии  $m = 3$ ; грунт береговых склонов – песок речной; примерная отметка дна в прибрежной зоне – не менее 2 м от уреза воды.

В результате расчетов габаритных параметров рекомендовано принимать: верхнюю границу крепления береговых откосов с учетом ветрового нагона и наката волн не ниже отметки 125,4 м, нижнюю – не выше 118,3 м, толщину габионных конструкций – 0,23 м, заполняемых камнем со средним диаметром  $d_{50\%} = 0,12$  м.

Размывающая скорость под матрасами на границе габион-грунт ( $v_h$ ) для предлагаемой конструктивной базовой схемы была найдена по формуле:

$$v_h = n_f^{-1} (0,5 d_{50\%})^{2/3} i^{1/2}, \quad (4)$$

где  $i$  – уклон склона;  $n_f$  – коэффициент шероховатости поверхности берегового склона под матрасом, учитывающий конструкцию обратного фильтра под габионом.

Поскольку под современными матрасно-тюфячными габионными конструкциями укладывается геотекстиль, был принят  $n_f = 0,02$  [2]; скорость фильтрации на границе габион – грунт для берегового откоса  $v_h = 3,42$  м/ч. Для несвязанного песчаного грунта средняя скорость фильтрации  $v_e$  была определена по формуле [12]:

$$v_e = 16,1 (d_{50\%})^{1/2}. \quad (5)$$

Таким образом, для левого берега Волги на участке агротуристического пространства «Топорок»  $v_e = 5,58$  м/ч. Оценка условия  $v_h \geq (2...4) v_e$ , которое необходимо соблюдать при проверке возможного размыва габионных конструкций [14],

показала, что на протяжении данного участка оно везде выполняется (например, в точке 2  $v_h = 3,43 \geq (2...4)5,58 = 11,15...22,31$  м/ч). Следовательно, вероятность размыва под габионами предлагаемой базовой конструкции мала. Проверки на возможность появления деформаций в случае, если действительные касательные напряжения для участков дна и берега превысят критические значения при известных числах Шильдса [13], подтвердили это.

В качестве укрепления берега у пристани (зона В) предпочтительно использовать эколого-позитивные крепления из природных материалов, которые наносят минимальный ущерб окружающей среде и создают приятную на вид, подобную природе конструкцию [2, 16]. Поскольку берегозащитное сооружение здесь служит и причалом для судов, и прогулочной набережной, в качестве дополнительного укрепления берега в зоне переменного уровня предлагаем использовать шпунтовые ряды из бревен: брусчатые или свайные (рис. 5в), не исключая при соответствующем обосновании в качестве материала локальное использование вырубленных деревьев при расширении территории агротуристического пространства «Топорок».

### Выводы

Для мониторинга развития эрозии берега водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования предложена методология построения карт распределения водного и вегетационного индексов, сгенерированных с картой рельефа местности, а также алгоритм расчета и выбора оптимальной конструкции берегоукрепления, зонированного на разных участках береговой линии Иваньковского водохранилища в рамках агротуристического пространства «Топорок». Выявленные эрозионные участки на картах подтверждены результатами натурного обследования и снимками берегов р. Волга на территории организуемого туристического кластера «Конаково-агротуризм» в Тверской области РФ.

Таким образом, предлагаемую методику мониторинга прибрежной зоны водных объектов можно довольно успешно использовать при оценке эрозионного состояния территорий АПК, подверженных экзогенным процессам.



## Список использованных источников

1. Егоров И.Е. Капельно-дождевая эрозия – рельефообразующее значение и методы изучения // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2015. Т. 25, № 2. С. 159-166.
2. Черных О.Н. Особенности изменения профиля склона пойменных дамб и берегов водных объектов при волновом воздействии / О.Н. Черных, А.В. Бурлаченко // Природообустройство. 2023. № 2. С. 81-85. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-57-62>
3. Черных О.Н. Проблемы безопасности и восстановления прибрежной зоны крупных водных объектов АПК, находящихся под воздействием экзотических процессов (на примере Крыма): монография: коллектив авторов / А.Э. Авакян, Е.С. Баранова, И.А. Барановская [и др.]. Петрозаводск: МЦНП «НОВАЯ НАУКА», 2024. 533 с., С. 406-428. ISBN 978-5-00215-454-8. DOI 10.46916/05112024-1-978-5-00215-454-8.
4. Чинь Л. Комбинированное использование изображений Landsat 8 и Sentinel 2A для улучшения пространственного разрешения температуры поверхности Земли / Л. Чинь, В.Р. Заблоцкий // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. 2021. № 6(99). С. 45-63. DOI: 10.18698/1812-3368-2021-6-45-63
5. Семёнова К.С. Оценка состояния подземных инженерных сооружений мелиоративной системы с помощью карт влажности, полученных на основе данных дистанционного зондирования земли беспилотным летательным аппаратом DJI PHANTOM 4 MULTISPECTRA // Природообустройство. 2023. № 3. С. 31-35. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-31-35.
6. Семёнова К.С. Идентификация береговой эрозии с помощью современных цифровых технологий // Материалы Международной научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича, Москва, 3-5 июня 2024 г. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. С. 23-27. EDN: SZZHSQ.
7. Даценко Ю.С. Влияние Иваньковского водохранилища на качество Волжского источника водоснабжения г. Москвы // Вестник Московского университета. Серия 5 «География». 2021. № 5. С. 124-130.
8. Грипанцева Е.С. Эколого-геохимические исследования малых рек, впадающих в Иваньковское водохранилище (р. Волга) / Е.С. Грипанцева, Я.В. Бычкова, Л.П. Федорова // Вода: химия и экология. 2019. № 1-2. С. 15-26. EDN: CLFJSF
9. Jintao Liang, Chao Chen, Yongze Song, Weiwei Sun, Gang Yang. Sustainable Horizons Long-term mapping of land use and cover changes using Landsat images on the Google Earth Engine Cloud Platform in bay area – A case study of Hangzhou Bay, China Author links open overlay panel. 2023. September. Vol. 7. 100061.
10. NDVI – teoriya i praktika. [Elektronnyj resurs]. GISLAB [sait]. URL: <http://gislab.info/qa/ndvi.html> (data obrascheniya: 12.08.2021).
11. Белоцерковский М.Ю. Экология эрозионно-русловых систем России / М.Ю. Белоцерковский, К.М. Беркович, О.В. Виноградова, Н.Г. Добровольская и др. / Монография / Под ред. Р.С. Чалова. М.: Географический ф-т МГУ, 2002. 163 с.
12. Черных О.Н. Берегоукрепительные конструкции водных объектов: учебное пособие / О.Н. Черных, Н.В. Ханов, Н.В. Бурлаченко. Часть 1. М.: Российский

## References

1. Egorov I.E. Drip-rain erosion – relief-forming significance and methods of study / I.E. Egorov // Bulletin of the Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences. 2015. Vol. 25, No. 2. P. 159-166.
2. Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Features of changes in the slope profile of floodplain dams and banks of water bodies under wave action // Prirodoobustrojstvo. 2023. No. 2. P. 81-85.
3. Chernykh O.N., et al. Problems of safety and restoration of the coastal zone of large water bodies of the agro-industrial complex, influenced by exogenous processes (on the example of Crimea) / monograph: collective of authors / A.E. Avakyan, E.S. Baranova, I.A. Baranovskaya [et al.]. Petrozavodsk: MCNP "NEW SCIENCE", 2024. 533, P. 406-428. ISBN 978-5-00215-454-8. DOI 10.46916/05112024-1-978-5-00215-454-8.
4. Chin L. Combined use of Landsat 8 and Sentinel 2A images to improve the spatial resolution of the Earth's surface temperature / L. Chin, V.R. Zablotsky // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Natural Sciences Series. 2021. No. 6 (99). P. 45-63. DOI: 10.18698/1812-3368-2021-6-45-63
5. Semenova K.S. Assessment of the state of underground engineering structures of the reclamation system using moisture maps obtained from remote sensing data from the DJI PHANTOM 4 MULTISPECTRA unmanned aerial vehicle / K.S. Semenova // Prirodoobustrojstvo. No. 3, 2023. P. 31-35. DOI 10.26897/1997-6011-2023-3-31-35
6. Semenova K.S. Identification of coastal erosion using modern digital technologies / K.S. Semenova // Proceedings of the International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists dedicated to the 150th anniversary of the birth of A.Ya. Milovich: Collection of articles, Moscow, June 03-05, 2024. Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2024. P. 23-27. EDN SZZHSQ.
7. Datsenko Yu.S. The influence of the Ivankovskoye Reservoir on the quality of the Volga water supply source of Moscow / Yu.S. Datsenko // Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography. 2021. No. 5. P. 124-130.
8. Grishantseva E.S. Ecological and geochemical studies of small rivers flowing into the Ivankovskoye Reservoir (Volga River) / E.S. Grishantseva Ya.V. Bychkova, L.P. Fedorova // Water: chemistry and ecology. 2019. No. 1-2. P. 15-26. EDN: CLFJSF
9. Jintao Liang, Chao Chen, Yongze Song, Weiwei Sun, Gang Yang Sustainable Horizons Long-term mapping of land use and cover changes using Landsat images on the Google Earth Engine Cloud Platform in bay area – A case study of Hangzhou Bay, China Author links open overlay panel – Volume 7, September 2023-100061.
10. NDVI – theory and practice [Electronic resource] GISLAB [sait]. – URL: <http://gislab.info/qa/ndvi.html> (data obrascheniya 12.08.2021).
11. Belotserkovsky M.Yu. Ecology of erosion-channel systems of Russia: monograph / M.Yu. Belotserkovsky K.M. Berkovich, O.V. Vinogradova, N.G. Dobrovolskaya i dr. Under the editorship of R.S. Chalov. Moscow: Faculty of Geography, Moscow State University, 2002. 163 p.
12. Chernykh O.N. Bank protection structures of water bodies: a tutorial / O.N. Chernykh, N.V. Khanov, N.V. Burlachenko. Volume Part 1. Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev, 2018. 164 p.

государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2018. 164 с.

13. СТО НОСТРОЙ 2.33.22-2011. Мелиоративные системы и сооружения. Габийонные противозрозионные сооружения. Общие требования по проектированию и строительству. М.: ФГБНУ «РосНИИПИМ», 2012.

14. Каганов Г.М. Гидротехнические сооружения из армированного грунта: монография / Г.М. Каганов, И.М. Евдокимова, К.И. Шевченко. М: НИИ-Природа. 2004, 607 с.

15. Ханов Н.В. Биоинженерные технологии защиты и обустройства прибрежных земель малых водных объектов АПК / Н.В. Ханов, О.Н. Черных, С.О. Курбанов, Ф.Т. Дударова // Природообустройство, № 3, 2024. С. 53-63. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-53-63>

#### Об авторах

**Кристина Сергеевна Семенова**, канд. техн. наук, доцент; Scopus: 57488382700; ORCID: 0000-0002-4446-4435, SPIN-код: 426-1908; AuthorID: 912890; [kristi11.05.88@yandex.ru](mailto:kristi11.05.88@yandex.ru)

**Ольга Николаевна Черных**, канд. техн. наук, доцент; WoS ResearcherID: S-2542-2018; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID: 0000-0003-2905-446X; SPIN-код: 7757-7969; AuthorID: 692667; [chernih@rgau-msha.ru](mailto:chernih@rgau-msha.ru)

#### Критерии авторства / Authorship criteria

Семёнова К.С., Черных О.Н. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / The authors made an equal contribution to the preparation of the publication

#### Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare that there are no conflicts of interest

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 14.02.2025

Поступила после рецензирования / Received after peer review 05.03.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 05.03.2025

13. STO NOSTROY2.33.22-2011 Reclamation systems and structures. Gabion anti-erosion structures. General requirements for design and construction. Moscow: Federal State Budgetary Scientific Institution "RosNIIPM". 2012.

14. Kaganov G.M. Hydraulic structures made of reinforced soil: monograph / G.M. Kaganov, I.M. Evdokimova, K.I. Shevchenko. M: NIA-Priroda, 2004, 607 p.

15. Khanov N.V. Bioengineering technologies for the protection and development of coastal lands of small water bodies of the agro-industrial complex / N.V. Khanov, O.N. Chernykh, S.O. Kurbanov, F.T. Dudarova. // Prirodoobustroystvo. No. 3, 2024. P. 53-63. <https://doi.org/10.26897/1997601120242-53-63>

#### About the authors

**Kristina S. Semenova**, CSc (Eng), associate professor; Scopus: 57488382700; ORCID: 0000-0002-4446-4435, SPIN-code: 426-1908; AuthorID: 912890; [kristi11.05.88@yandex.ru](mailto:kristi11.05.88@yandex.ru)

**Olga N. Chernykh**, CSc (Eng), associate professor; WoS ResearcherID: S-2542-2018; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID: 0000-0003-2905-446X; SPIN-code: 7757-7969; AuthorID: 692667; [chernih@rgau-msha.ru](mailto:chernih@rgau-msha.ru)

Semenova K.S., Chernykh O.N. performed theoretical and experimental research, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript, they have copyright for the article and are responsible for plagiarism.