МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

Научная статья / Scientific paper
УДК: 627.222.5:528.8.04
DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.367

Методы моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов существующих водохранилищ

М.В. Степанова, В.Н. Экзарьян
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия
e-mail: Stepanova-mariya2702@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены основные методы моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов водохранилищ, выделены их положительные и отрицательные стороны. Актуальность выбранной тематики заключается в том, что в период с 1990-х годов по настоящее время на многих водохранилищах ведутся бессистемные мониторинговые наблюдения за процессом переработки берегов водохранилищ, что в конечном итоге может привести к критическим последствиям: разрушению прибрежной инфраструктуры, нарушению целостности геологической среды, увеличению площадей «потерянных» земель вблизи береговой зоны водохранилищ. С момента создания водохранилища и по сей день площади «потерянных» земель только увеличиваются и составляют десятки тысяч гектаров. Анализ публикаций за последние 30 лет, содержащих результаты изучения переработки берегов равнинных водохранилищ, указывает на отсутствие каких-либо серьезных разработок в части создание и внедрения методов прогнозирования изучаемого процесса. В работе были рассмотрены основные методы моделирования и прогнозирования: механико-детерминистический метод, метод натурных моделей и метод стохастических моделей. При моделировании необходимо определение точности применяемых методов и достоверности выполненных прогнозов. Проведение верификации моделей и оценка точности прогноза является ключевой и неотъемлемой частью прогнозирования и моделирования любого экзогенного геологического процесса. Предложен новый подход к моделированию и прогнозированию процесса, базирующийся на детальном изучении указанных методов, использовании материалов дистанционного зондирования Земли и методов математической статистики.

Ключевые слова: переработка берегов водохранилищ; классификация методов моделирования и прогнозирования; дистанционное зондирование; верификация данных.
Для цитирования: Степанова М.В., Экзарьян В.Н. Методы моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов существующих водохранилищ // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 4. С. 367–379. DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.367.

Methods for Modeling and Forecasting Shoreline Erosion in Existing Reservoirs

Maria V. Stepanova, Vladimir N. Ekzaryan
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia
e-mail: Stepanova-mariya2702@yandex.ru

Abstract. This article examines the principal methods for modeling and forecasting shoreline erosion processes in reservoirs and highlights their advantages and limitations. The relevance of this research stems from the fact that since the 1990s, monitoring of shoreline erosion at many reservoirs has been conducted in an unsystematic manner, which may ultimately lead to critical consequences: destruction of coastal infrastructure, disruption of the geological environment's integrity, and an increase in the area of "lost" lands adjacent to reservoir shorelines. Since the establishment of these reservoirs, the extent of such lost lands has continued to grow, now amounting to tens of thousands of hectares. An analysis of publications over the last 30 years regarding the shoreline evolution of plain reservoirs indicates a lack of significant developments in the creation and implementation of methods for predicting

the studied process. This paper evaluates the principal modeling and forecasting methodologies: mechanistic-deterministic, physical scale modeling, and stochastic modeling. When applying these models, it is essential to determine their accuracy and the reliability of the resulting forecasts. Model verification and assessment of forecast precision are crucial and integral components of predicting and simulating any exogenic geological process. A new approach to modeling and forecasting the process is proposed, based on a detailed study of these methods, using materials from remote sensing of the Earth and methods of mathematical statistics.

Keywords: reservoir shoreline erosion; classification of modeling and forecasting methods; remote sensing; data verification.

For citation: Stepanova M. V., Ekzaryan V. N. Methods for Modeling and Forecasting Shoreline Erosion in Existing Reservoirs. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 4, pp. 367–379. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.4.367. (In Russian; abstract in English).

Введение

Строительство масштабных гидротехнических сооружений, в частности создание больших и малых водохранилищ, в середине XX века привело к значительному увеличению площади «потерянных» земель. Перед специалистами того времени возникла проблема проведения и организации режимных наблюдений за развитием экзогенных геологических процессов в пределах прибрежной зоны водохранилищ. Особое внимание уделялось процессу переработки берегов водохранилищ.

Процесс переработки берегов водохранилищ приводит к потере огромных площадей земель, угрозе для прибрежных сооружений и коммуникаций, а также загрязнению водоемов.

С начала 1990-х гг. по настоящее время постоянные режимные (мониторинговые) наблюдения за процессом переработки берегов водохранилищ Волжского каскада практически не ведутся, что приводит к колоссальным негативным последствиям как для жизнедеятельности человека, так и для окружающей природной среды в целом.

Цель работы заключается в рассмотрении существующих методов моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов водохранилищ и обосновании наиболее подходящего из них с учетом использования современных способов получения и обработки информации о наличии и интенсивности процесса разрушения прибрежной территории.

Материалы и методы

Термин «переработка берегов водохранилищ» был введен академиком Ф.П. Саваренским в 1935 г. [1]. Под термином предложено понимать процесс разрушения и видоизменения береговой зоны искусственных водоемов (водохранилищ) под действием комплекса геологических процессов, гидродинамических факторов и климатических условий. Как показали многолетние режимные наблюдения наиболее интенсивно процесс переработки берегов протекает в первые годы после наполнения чаши водохранилища.

Площади «потерянных» земель за счет активизации процесса переработки берегов водохранилищ за период 1975–2005 гг. по водохранилищам Волжского каскада, Москворецкой системы и канала имени Москвы приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что более трети общих потерь приходятся на территории сельскохозяйственного использования [2].

Благодаря этим данным, можно сказать о том, что процесс переработки берегов активно протекает, несмотря на предположения отдельных исследователей о затухании процесса во времени. Десятки тысяч гектар земель были «потеряны» в результате активности данного процесса.

К основным характеристикам процесса переработки берегов водохранилищ принято относить величину линейного отступания бровки берегового склона (м) и (или) объем размытых пород (м^3).

К факторам-условиям данного процесса относятся геолого-литологическое строение берегов, геодинамические условия, морфология прибрежной части берегового склона (высота берегового склона (клифа), ширина надводной и подводной части отмели, крутизна отмели и др.).

Таблица 1. Площадь «потерянных» земель за период 1975–2005 гг. по водохранилищам Волжского каскада, Москворецкой системы и канала имени Москвы

Table 1. The area of "lost" lands for the period 1975–2005 in the reservoirs of the Volga Cascade, the Moskvoretsky system and the Moscow Canal

Виды использования прибрежных территорий	Протяженность береговой линии, подверженной переработке, п. км	Площадь «потерянных» земель, га
Населенные пункты	417,2	1867,1
Сельскохозяйственные угодья	1218,8	4230,9
Лес	1547,7	6196,2
Всего	3183,7	12294,2

Факторы-процессы: волновой режим, колебание уровня воды в водохранилище, течения; климатические (ветровой режим, режим атмосферных осадков, ледовый режим); прочие, такие как судовое волнение, хозяйственная деятельность человека, растительность и др. Факторы-процессы взаимодействуют друг с другом и по-разному влияют на интенсивность переработки берегов водохранилища [3].

Процесс переработки берегов водохранилищ протекает в две стадии: неустановившегося и квазиустановившегося режима, что видно из графика изменения величины переработки берегов Волгоградского водохранилища, построенного по данным режимных наблюдений за процессом с 1960 по 2000 гг. (рисунок 1). На первой стадии размыв осуществляется в основном за счет ударно-механического, динамического воздействия волн и значительного колебания уровня водохранилища. На второй стадии берегообрушение происходит за счет воздействия комплекса факторов и в значительной степени определяется геологическим строением берегового склона и сформированной надводной и подводной части отмели. При этом энергия волн и изменения уровенного режима водохранилища является основными факторами-процессами, определяющими интенсивность переработки берегов [3].

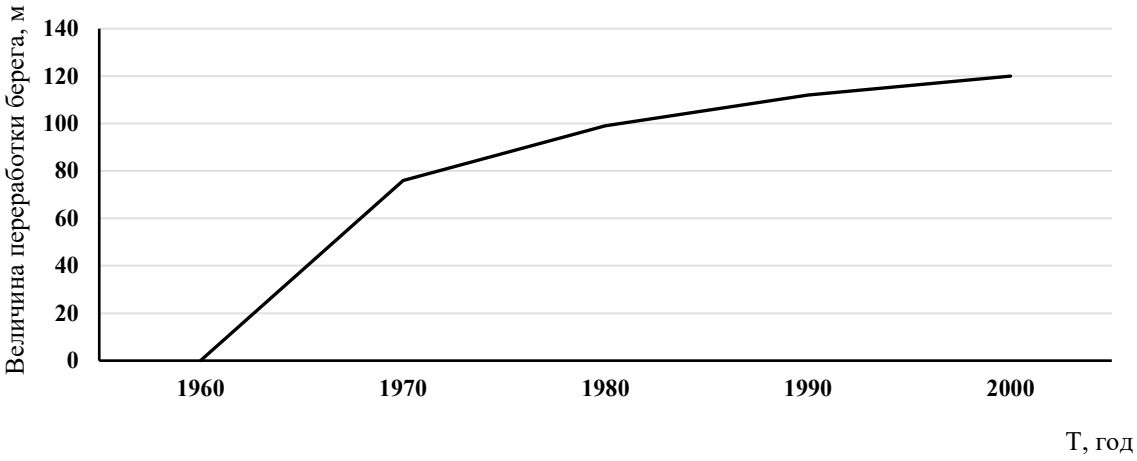

Рисунок 1. Обобщенный график изменения величины переработки берегов Волгоградского водохранилища

Figure 1. Generalized graph of changes in the amount of processing of the shores of the Volgograd reservoir

В процессе выполнения работы были собраны и проанализированы научные разработки исследователей по созданию и использованию методов прогнозирования процесса переработки берегов водохранилищ, а также производственные отчеты различных

организаций, содержащие результаты моделирования и прогноза при использовании этих методов. Изучаемый процесс относится к основным базовым процессам функционирования и эволюции водохранилищ. Процесс переработки водохранилищ наглядно представлен на рисунке 2. В летний период с 2024 по 2025 гг. авторами были проведены натурные наблюдения в пределах береговой зоны Волгоградского водохранилища с одноразовыми промерами в местах ранее заложенных режимных створов для определения берегов, подверженных процессу.

Рисунок 2. Процесс переработки берегов Волгоградского водохранилища (г. Камышин)
Figure 2. The process of processing the banks of the Volgograd reservoir (Kamyshin city)

Основные методы и модификации методов прогноза были разработаны в 1950-х гг. Н.Е. Кондратьевым, Б.А. Пышкиным, Е.Г. Качугиным, Л.Б. Розовским, Г.С. Золотаревым и др. Все методы фактически были разработаны для проектируемых водохранилищ и основаны на принципе, который можно назвать механико-детерминистическим [4].

Процесс переработки берегов водохранилищ существенно полифакторный и является неоднородным в пространстве и нестационарным во времени, а также характеризуется кумулятивным эффектом запаздывания по отношению к воздействию факторов на окружающую природную среду, что особенно ощутимо внутри годового цикла.

В середине 1970-х гг. был разработан новый метод прогноза процесса переработки берегов водохранилищ – метод стохастических моделей. Данный метод позволил повысить точность прогнозов для существующих водохранилищ за счет полного использования эмпирических результатов режимных (мониторинговых) наблюдений за процессом переработки берегов и факторами, его обуславливающими. Использование методов математической статистики и, в частности, многомерного

регрессионного анализа, открывало возможность более полного учета факторов процесса на основе его детальных геологической и физической моделей. Метод стохастических моделей универсален как для равнинных, так и горных водохранилищ, а также для водохранилищ в любых регионально-геологических, зонально-климатических и техногенных условиях [4].

Результаты

Анализ научной литературы за последние десятилетия показал, что мониторинговые наблюдения за процессом переработки берегов равнинных водохранилищ ведутся бессистемно. Многие ученые указывают на необходимость изучения процесса и разработку новых методов прогноза для условий квазиустановившегося режима с учетом современных методов получения и обработки мониторинговой информации [5–7]. Однако большинство научных статей посвящено определению основных причин переработки берегов, проведению мониторинговых наблюдений как натурным методом, так и при помощи использования материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [8–10], прогнозам процесса по «классическим» методам Г.С. Золотарева, Л.Б. Розовского, Е.Г. Качугина и др. [11, 12]. Большой вклад в современное изучение процесса переработки берегов водохранилищ внес В.Е. Левкевич [13, 14], в работах которого рассмотрены оценка влияния процесса на прилегающие территории, изучение динамики процесса с применением беспилотных летательных аппаратов, а также результаты инженерно-геологического районирования берегов водохранилищ и др. Проведенный анализ указывает, что за прошедшие десятилетия не было разработано новых методов прогнозирования процесса переработки берегов водохранилищ. В настоящее время наличие новых технологий получения и обработки информации требует совершенствования методологии изучения и прогнозирования процесса берегообрушения на существующих водохранилищах. Однако для определения репрезентативных факторов и условий протекания процесса переработки берегов необходимо детальное изучение результатов всех ранее выполненных исследований и в первую очередь «классических» методы прогноза, прошедших многолетнюю апробацию.

В работе рассмотрены методы прогноза переработки берегов водохранилищ, такие как: группа механико-детерминистических методов Н.Е. Кондратьева [15], Е.Г. Качугина [16], Г.С. Золотарева [17], метод натурных моделей Л.Б. Розовского [18-20], метод стохастических моделей В.К. Епишина – В.Н. Экзарьяна [21].

Механико-детерминистический метод.

Суть механико-детерминистического метода состоит в следующем: в геолого-гидрологической постановке задачи (абразионный процесс) учитываются волноэнергетическое воздействие на подводный и надводный склоны берега с фиксированными геоморфологическими и геолого-литологическими характеристиками; в математической модели используются только детерминированные методы. Наиболее глубокую теорию и полный алгоритм метода прогноза, основанного на механико-детерминистических принципах, раньше других, в 1953 г., предложил Н.Е. Кондратьев [15]. Другие методы, основанные на этом принципе, иногда разрабатывавшиеся независимо от метода Н.В. Кондратьева и опиравшиеся на работы В.А. Ширямова [22] и Б.В. Полякова [23], иногда даже расширявшие учет некоторых факторов переработки (за счет сужения учета других), являются с современной точки зрения частными случаями «принципа Кондратьева».

Эти методы можно подразделять на две подгруппы [24, 25]: методы, основанные на определении расчетной энергии ветрового волнения, и методы, основанные на учете морфометрии прибрежных отмелей. По существу, это единая группа методов, поскольку в методах первой подгруппы всегда учитываются углы прибрежных отмелей в явном виде, а в методах второй подгруппы всегда учитывается, но в неявном виде, энергия ветрового волнения и высота волн различной обеспеченности.

Методологические недостатки этой единой группы механико-детерминистических методов,

основанных «на принципе Кондратьева», следующие:

- существенная неполнота учитываемых факторов процесса (механических сил волнового (абразионного) и неволнового разрушения пород, слагающих береговой склон и сопротивления пород этому разрушению);
- детерминистическая природа используемых в методе математических моделей.

Первый недостаток отмечали многие исследователи, использующие эти методы при прогнозировании процесса переработки берегов. Причина существования этого недостатка объясняется малой натурной изученностью факторов и процесса переработки берегов водохранилищ (отсутствием представительных выборок рядов длительных наблюдений) и потому недостаточным в тот период времени знанием механизма процесса.

Второй недостаток заключается в том, что если рассмотреть общий вид прогнозной математической модели процесса переработки берегов, то можно заметить, что функции в правой части уравнения, описывающие уровенный и волноэнергетический режим водохранилища (факторы-процессы), являются стохастическими. А стохастический процесс адекватно может быть описан только с применением вероятностного математического аппарата, что невозможно в методах рассматриваемой группы.

Метод для расчёта переработки берегов водохранилищ Е.Г. Качугина был разработан в 1959 году [4]. Он заключается в определении скорости и величины отступания берегового уступа на заданный срок. Метод предполагает, что объёмы переработки берега пропорциональны суммарной энергии волн, воздействующих на него. Е.Г. Качугин отмечает, что в переработке берега водохранилища участвуют волны всех высот, а общий объём размытых пород пропорционален суммарной энергии волн в конкретном месте. Интенсивность процесса переработки зависит от сопротивления пород размыву и высоты берега. Процесс переработки берега затухает во времени, его изменение характеризуется кривой параболического вида.

Метод Е.Г. Качугина [16] имеет следующие ограничения:

- практически неприменим при прогнозе абразионного развития берегов, сложенных дисперсными породами;
- для высоких склонов со сложным геолого-литологическим строением, в котором участвуют скальные и полускальные грунты, расчёты по этому методу менее надёжны, так как коэффициенты размываемости упрощённо учитывают процессы разуплотнения и выветривания массивов пород;
- существенно редуцированный набор причин и условий процесса, учитываемых при расчете.

Разработанный Г.С. Золотаревым в 1969 г. графоаналитический метод дает возможность выполнить прогноз переработки берега на десятилетний период и на момент его полной стабилизации [17]. В основе метода лежит комплексный анализ геоморфологических, геологических и гидрогеологических условий.

Метод дает возможность рассчитать ширину зоны переработки берега и построить его новый профиль для конечной стадии периода эксплуатации водохранилища. Метод основан на построении профилей прогноза с использованием величин углов наклона отмели, пляжа и устойчивого подводного откоса, изменяющихся в зависимости от состава, состояния и свойств горных пород, слагающих берега водохранилищ. Исследователем предложена таблица с расчетными значениями углов абразионной прибрежной отмели, зон наката волн и коэффициентов аккумуляции, рекомендуемых для построения профилей прогноза переработки береговых склонов водохранилищ.

Построение профиля прибрежной отмели методом Г.С. Золотарева [17] выполняется применительно к уровню водохранилища, отвечающему заранее заданной повторяемости его положения. Для определения ширины подводной отмели производится ряд построений.

Для построения прогнозного профиля требуется следующий набор исходной информации: гидродинамические параметры акватории (высота и длина волн в зависимости от интенсивности и повторяемости ветра, с учетом

батиметрии и рельефа побережья); режим колебаний уровня воды в водохранилище для маловодных и многоводных периодов; инженерно-геологические модели береговых массивов в крупных масштабах (1:1000 – 1:200), включающие описание микрорельефа, литологии и свойств слагающих пород; сведения о гидрогеологическом режиме (количество, уровень и динамика водоносных горизонтов, а также степень их воздействия на устойчивость берегов); морфометрические характеристики устойчивости склонов, типичные для различных геолого-генетических типов горных пород.

Начальным этапом моделирования является определение местоположения бровки уступа подводной части отмели. Эта точка находится ниже отметки нормального подпорного горизонта (НПГ) на глубине, соответствующей величине максимального размыва.

Основными недостатками данного метода являются: схематизм – углы наклона отмели и коэффициента аккумуляции определяются в зависимости только от литологического состава пород; недостаточный учет факторов-процессов (волновой режим, уровенный режим, течения и другие).

Метод натурных моделей.

В основе метода лежит критериальный перенос эмпирических результатов исследований процесса переработки берегов водохранилищ с «натурной модели», охарактеризованной данными режимных (мониторинговых) наблюдений, на «натурный объект», требующий прогноза. Отсюда ясно, что метод Л.Б. Розовского [18–20] позволяет автоматически учитывать все особенности физической природы процесса переработки берегов водохранилищ, в том числе и его стохастичность. Другим важным преимуществом является универсальность метода в отношении прогнозов процесса переработки берегов: он с равным успехом применим для проектируемых и эксплуатируемых водохранилищ. В последнем случае помимо основной может быть предложена еще одна модификация метода – экстраполяция во времени параметров (характеристик) процесса переработки берегов по одному и тому же участку (створу). Понятно, что условия (критерии подобия) и пределы экстраполяции должны быть теоретически строго обусловлены, но в этой модификации метод фактически пересекается с методом кинематических стохастических моделей.

Единственным ограничением, накладываемым на метод Л.Б. Розовского [18], является малочисленность набора натурных моделей.

Метод стохастических моделей.

Метод стохастических моделей В.К. Епишина – В.Н. Экзарьяна [4] представляет собой подход к анализу и прогнозированию сложных систем, основанный на построении иерархии стохастических (вероятностных) моделей. Ключевая идея заключается в том, чтобы не пытаться создать одну сверхсложную модель, а разбить систему на уровни, где каждый следующий уровень уточняет и детализирует предыдущий, используя методы математической статистики и теории вероятностей.

Метод стохастических моделей разработан в двух модификациях: кинематической и динамической. Принципиальные преимущества данного метода следующие:

- стохастическая природа моделей в явном виде;
- эмпирическая природа стохастических моделей (отсутствие необходимости в априорных допущениях – в отличие от метода Н.В. Кондратьева);
- аналитическая природа стохастических моделей;
- существенная многомерность стохастических моделей;
- универсальность моделей в отношении всего разнообразия регионально-геологических, зонально-климатических и техногенных условий водохранилищ.

Основы метода базируются на принципах многоуровневости системы и ее иерархичности. В отличие от детерминированных моделей, метод признаёт и количественно оценивает влияние случайных факторов. На всех уровнях используются вероятностные распределения, случайные процессы и статистические оценки. Модели могут корректироваться по мере

поступления новых данных, что делает метод пригодным для прогнозирования в условиях изменяющейся среды.

В то же время теоретическая проработка геологической и физической моделей процесса переработки берегов водохранилищ, положенных в основание метода стохастических моделей, учитывает результаты натурных и лабораторных экспериментов и теоретических исследований при создании, внедрении и проверке других методов прогноза, в том числе новые результаты, а также возможность более детальной, чем в прежних методах, проработки геологической и физической моделей процесса переработки берегов водохранилищ и реализация ее в математической модели и численных методов прогноза.

Для выполнения процедуры прогноза необходимо: во-первых, определить цель, срок (период) и точность прогноза процесса переработки берегов водохранилищ; во-вторых, определить объект исследования (размер участка, количество створов), выбрать метод прогноза и определить конкретный алгоритм прогноза; в-третьих, проанализировать материал по величине переработки берега (ВПБ), построить кинематические модели процесса, определить информативность факторов переработки берегов, произвести специальное инженерно-геологическое районирование прибрежной территории. Выбор метода прогноза является важнейшей задачей. Далее по выбранным моделям выполняется непосредственно прогноз процесса на заданный срок.

Исходя из вышесказанного, для моделирования и прогноза процесса переработки берегов водохранилищ на срок 10 и более лет лучше использовать метод стохастических моделей В.К. Епишина – В.Н. Экзарьяна [4, 21]. Данный метод дает хорошее приближение к натуре, так как базируется на реальном проявлении процесса переработки берегов на каждом конкретном участке водохранилища с учетом полифакторности и вероятностной природы процесса.

В настоящее время мониторинговые наблюдения за процессом переработки берегов водохранилищ можно усовершенствовать с помощью данных ДЗЗ. Дешифрирование аэрофотоснимков и космических снимков позволяет определить величину переработки берега (ВПБ) по множеству визуально заложенных наблюдательных створов за заданный срок существования водохранилища, однако этот метод эффективен только при условии перехода процесса в квазистационарный режим.

При дешифрировании материалов ДЗЗ выделяются участки прибрежной территории водохранилища, подверженные процессу переработки берегов и участки, на которых процесс не проявляется. В пределах подверженных процессу участков определяется ВПБ по заданному сроку. Для этого закладываются множество «наблюдательных створов» в пределах прибрежной территории водохранилища. По результатам дешифрирования материалов дистанционных методов составляется выборка, включающая значения ВПБ по «наблюдательным створам» на заданный период времени, показатели факторов-условий на начальный год моделирования и факторов-процессов на выбранный период прогноза. Общая выборка подразделяется на основную выборку, по материалам которой строится прогнозная модель, и контрольную, по которой проводится верификация (оценка точности) прогноза.

По данным основной выборки «методом стохастических моделей» проводится построение прогнозной модели процесса переработки берегов конкретного водохранилища или участка береговой полосы и составляется прогноз на заданный срок.

Оценка точности прогнозных моделей проводится путем их верификации на основы данных контрольной выборки.

Обсуждение

В середине XX века при прогнозировании процесса переработки берегов водохранилищ использовались преимущественно детерминированные математические модели (работы Е.Г. Качугина, Н.Е. Кондратьева, Л.Б. Розовского). Однако, тот факт, что процесс является многофакторным (неоднородным в

пространстве и нестационарным во времени) дал возможность использования метода стохастических моделей.

Наиболее известные методы прогноза изучаемого процесса Г.С. Золотарева, Е.Г. Качугина, Н.Е. Кондратьева являются фактически методами прогноза процесса переработки берега проектируемых водохранилищ. В этих методах, обладающих более широкой областью применения (в принципе, они применимы и для прогнозов по существующим водохранилищам), процесс сильно схематизирован, что может приводить к большим ошибкам при прогнозировании процесса переработки берегов. Кроме этого, применение этих методов для прогнозов изучаемого процесса на существующих водохранилищах не позволяет в явном виде использовать имеющуюся мониторинговую информацию.

Как показала «ретроспективная проверка» прогнозов процесса переработки берегов водохранилищ, максимальные ошибки метода стохастических моделей, основанного на конкретной геологической (физической) модели и использовании существенной части накопленной информации, на порядок меньше.

Данный метод универсален и используется для составления прогнозов процесса для любых существующих водохранилищ (равнинных и горных) в любых регионально-геологических, зонально-климатических и техногенных ситуациях при условии построения моделей на эмпирическом режимном (мониторинговым) материале данного же водохранилища. Степень надежности полученных прогнозов определяется, прежде всего, длительностью стационарных наблюдений за характеристиками и факторами процесса конкретного водохранилища, а также полнотой и точностью этих наблюдений.

Использование материалов дистанционного ДЗЗ, аэрофотоснимков и космических снимков резко увеличивает информационное обеспечение моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов и в комплексе с «методом стохастических моделей» позволяет повысить оперативность и точность выполнения прогнозов изучаемого процесса.

В основу разработки нового метода моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов водохранилищ положены следующие положения:

- изучение рассмотренных «классических» методов позволяет определить наиболее репрезентативные факторы, определяющие наличие и активность процесса переработки водохранилища;
- использование материалов ДЗЗ дает возможность получить неограниченное количество данных, имеющих высокую разрешающую способность для определения количественных характеристик процесса и факторов его обуславливающих;
- применение современных методов обработки большого количества информации с помощью нейросетей и машинного обучения. Комбинируя различные архитектурные модели нейронных сетей, такие как LLM (большие языковые модели), RNN (рекуррентные нейронные сети), CNN (свёрточные нейронные сети) можно добиться достаточно быстрой и высокоточной обработки данных, в том числе фото-видео формата, с целью их систематизации и анализа;
- использование метода стохастических моделей, который показал минимальные ошибки при прогнозировании изучаемого процесса на водохранилищах Волжского каскада в качестве базового для построения моделей.

Основными особенностями рассматриваемого метода моделирования и прогнозирования переработки берегов водохранилищ являются:

1. не требует проведения натурных мониторинговых наблюдений;
2. обладает неограниченном увеличением объема информации о характеристиках процесса и факторах его обуславливающих;
3. повышается информативность и достоверность прогнозов.

Заключение

Анализ научной литературы показал, что за последние десятилетия исследователями не было

предложено нового метода моделирования и прогноза процесса переработки берегов водохранилищ. В основном работы ориентированы на проведение и получение результатов мониторинговых наблюдений с использованием беспилотных летательных аппаратов, определения основных причин проявления процесса и проведение прогноза общепринятыми «классическими» методами.

Для разработки нового метода был проведен анализ «классических» методов моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов водохранилищ, что позволило определить наиболее универсальный из них – метод стохастических моделей. Именно благодаря этому методу можно с минимальными погрешностями дать прогноз и составить модель изучаемого процесса. Неотъемлемой частью прогноза является оценка точности прогноза, которую можно провести двумя способами: сверкой с фактическими данными на заданный прогнозный год, либо проведение верификации прогнозных математических моделей на основе контрольной выборки.

Результатом исследования станет разработка нового метода моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов водохранилищ с использованием материалов ДЗЗ, а также использование нейросетей и методов математической статистики для обработки большого объема информации, что повысит точность, оперативность и надежность прогнозов.

Литература / References

1. Саваренский Ф.П. К вопросу о переработке береговых склонов реки при ее подпоре // Гидрогеология и инженерная геология. № 1. М.; Л.: ОНТИ, Гл. ред. геол.-развед. и геодез. лит., 1935. № 1. С. 5–14.

2. Экзарьян В.Н., Степанова М.В. Переформирование берегов водохранилищ как фактор социально-экологической опасности // Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы: Материалы восьмой научно-практической конференции, Воронеж, 10–13 сентября 2023 года. Воронеж: «Кварта», 2023. С. 113–115.
Ekzaryan V.N., Stepanova M.V. Reshaping of reservoir shores as a factor of socio-ecological danger // Ecological geology: theory, practice and regional problems: Proceedings of the eighth Scientific and Practical Conference, Voronezh, September, 10–13, 2023. Voronezh: Kvarta Publ., 2023, pp. 113–115. (In Russian).

3. Степанова, М.В., Экзарьян В.Н. Закономерности развития процесса переработки берегов равнинных водохранилищ // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48, № 2(91). С. 249–259. DOI 10.21285/2686-9993-2025-48-2-249-259.
Stepanova, M.V., Ekzaryan V.N. Patterns of development of the process of processing the shores of lowland reservoirs. Earth sciences and subsurface use, 2025, vol. 48, no. 2 (91), pp. 249–259. DOI 10.21285/2686-9993-2025-48-2-249-259. (In Russian).

4. Епишин В.К., Экзарьян В.Н. Прогноз процесса формирования берегов водохранилищ. М.: Энергия, 1979. 112 с.

5. Лагута А.А. О переработке берегов Краснодарского водохранилища // Региональные географические исследования: Сборник научных трудов / Под общей редакцией А.В. Погорелова. Том Выпуск 2 (12). Краснодар: Кубанский государственный университет, 2019. С. 23–30.
Laguta A.A. On the redevelopment of the shores of the Krasnodar Reservoir. Regional Geographical Studies: Collection of Scientific Papers. Krasnodar: Kuban State University, 2019, iss. 2 (12), pp. 23–30. (In Russian).

6. Егоров И.Е. О некоторых современных тенденциях развития берегов правобережья Воткинского водохранилища // Тридцать шестое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: Доклады и краткие сообщения, Ижевск, 11–15 октября 2021 года. Ижевск: Удмуртский государственный университет, 2021. С. 87–88.

Egorov I.E. On some contemporary trends in the development of the right bank of the Votkinsk Reservoir // Thirty-sixth plenary interuniversity coordination meeting on the problem of erosion, channel, and estuary processes: Reports and brief communications, Izhevsk, October 11–15, 2021. – Izhevsk: Udmurt State University, 2021. – pp. 87–88.

7. Скрипка Г.И., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А. [и др.]. Современная динамика берегов Цимлянского водохранилища // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа: Коллективная монография по материалам XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Том XII. Москва: Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, 2022. С. 540–546.
Skripka G.I., Ivlieva O.V., Bespalova L.A. [et al.]. Modern dynamics of the shores of the Tsimlyansk Reservoir // Modern problems of geology, geophysics, and geoecology of the North Caucasus: Collective monograph based on materials from the XI All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation. Volume XII. – Moscow: S.I. Vavilov Institute for the History of Natural Sciences and Technology, Russian Academy of Sciences, 2022. – pp. 540-546.

8. Ткачев А.А., Цыганок О.Р., Хумарашвили Л.Э., Ключенко К.И. Исследование основных причин переработки берегов водохранилищ // Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата: Материалы V Международной научно-практической интернет-конференции, Новочеркасск, 22–24 апреля 2024 года. Новочеркасск: Лик, 2024. С. 168–177.
Tkachev A.A., Tsyganok O.R., Khumarashvili L.E., Klyuchenko K.I. Research into the main causes of reservoir bank erosion // Land reclamation as a driver of modernization of the agro-industrial complex in the context of climate change: Proceedings of the V International Scientific and Practical Internet Conference, Novocherkassk, April 22–24, 2024. – Novocherkassk: Lik, 2024. – pp. 168–177.

9. Смирнов А.И. Оценка переработки берегов Павловского водохранилища на реке Уфа с использованием гистехнологий // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Труды VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 3 томах, Пермь, 30 мая 2019 года. Том I. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2019. С. 197–202.
Smirnov, A.I. Assessment of the processing of the banks of the Pavlovsk Reservoir on the Ufa River using histotechnologies // Contemporary problems of reservoirs and their catchment areas: Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation: in 3 volumes, Perm, May 30, 2019. Volume I. – Perm: Perm State National Research University, 2019. – pp. 197-202.

10. Алейникова, М.В. Геоинформационное картографирование процессов переработки берегов Цимлянского водохранилища // Материалы Научной сессии: В 2 т. Направления: VIII. Экономика и финансы. IX. Управление и региональная экономика. X. Математика и информационные технологии. XI. Физические науки. XII. Естественные науки. XIII. Приоритетные технологии. XIV. Сервис и туризм. XV. Психология и педагогика, Волгоград, 22–26 апреля 2019 года. Том 2. Волгоград: Волгоградский государственный университет, 2019. С. 217–221.
Aleyikova, M.V. Geoinformation mapping of the processing of the banks of the Tsimlyansk Reservoir // Materials of the Scientific Session: In 2 volumes. Areas: VIII. Economics and Finance. IX. Management and Regional Economics. X. Mathematics and Information Technology. XI. Physical Sciences. XII. Natural Sciences. XIII. Priority Technologies. XIV. Services and Tourism. XV. Psychology and Pedagogy, Volgograd, April 22–26, 2019. Volume 2. – Volgograd: Volgograd State University, 2019. – pp. 217–221.

11. Володин Н.И. Прогноз переработки берегов водохранилищ математическими методами // Геология и охрана недр. 2025. № 2(95). С. 80–88.
Volodin N.I. Forecast of reservoir bank processing using mathematical methods. Geology and Subsurface Protection, 2025, no. 2 (95). pp. 80–88. (In Russian).12. Журавлева В.В. Алгоритм численных расчетов

для модели переформирования берега внутреннего водоема // Известия Алтайского государственного университета. 2020. № 1(111). С. 89–94. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-14.

12. Zhuravleva V.V. Numerical calculation algorithm for the model of reshaping the shore of an inland water body. News of Altai State University, 2020, no. 1(111). pp. 89–94. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-14. (In Russian, Abstract in English).
13. Левкевич В.Е. Оперативная оценка масштабов комплексноговлияния водохранилищ на прилегающие территории // ICEP - 2023 Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: Сборник научных статей Международной научно-практической конференции, посвященной памяти доцента кафедры природообустройства, кандидата географических наук, доцента Шпока Ирины Николаевны, Брест, 16–17 октября 2023 года. Брест: Учреждение образования "Брестский государственный технический университет", 2023. С. 181–189.
    Levkevich V.E. Operational assessment of the scale of the complex impact of reservoirs on adjacent territories // ICEP - 2023 Current scientific, technical, and environmental problems of habitat conservation: Collection of scientific articles from the International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Associate Professor of the Department of Environmental Management, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor Irina Nikolaevna Shpok, Brest, October 16–17, 2023. – Brest: Brest State Technical University, 2023. – pp. 181–189.
14. Левкевич В.Е. Динамика береговых процессов на водохранилищах гидроэектростанций Беларуси // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: Сборник научных трудов IV международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 29 мая 2019 года. Том Выпуск 4. Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 2019. С. 259–270.
    Levkevich V.E. Dynamics of coastal processes at reservoirs of hydroelectric power plants in Belarus // Waterways and channel processes. Hydraulic structures of waterways: Collection of scientific papers of the IV International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, May 29, 2019. Volume Issue 4. – St. Petersburg: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2019. – pp. 259-270.
15. Кондратьев Н.Е. Расчеты ветрового волнения и переформирования берегов водохранилищ. Л., Гидрометеоздат, 1953. 110 с.
16. Качугин Е.Г. Рекомендации по изучению переработки берегов водохранилищ. Всесоюзный институт гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО). М.: Госгеолтехиздат, 1959. 89 с.
17. Золотарев Г.С. Инженерно-геологическое изучение береговых склонов водохранилищ и оценка их переработки. // «Труды лаборатории гидрогеологических проблем». М., АН СССР, т. 7, 1955. С. 38–57.
18. Розовский Л.Б. Введение в теорию геологического подобия и моделирования. М., «Недра», 1969. 126 с.
19. Розовский Л.Б. О прогнозе переработки берегов водохранилищ по аналогии. «Труды 7-го Байкальского научного координационного совещания по изучению берегов водохранилищ». М., «Наука», 1961. С. 45–57.
20. Розовский Л.Б. Переработка берегов водохранилищ за 10 лет эксплуатации // Гидротехническое строительство. №2. 1954. С. 37–52.
21. Епишин В.К., Экзарьян В.Н. Опыт прогнозирования переработки берегов существующих водохранилищ методом стохастических моделей // Экспресс-информация ВИЭМС. 1974. Вып. 8, № 8. С. 71–72.

22. Ширямов В.А. К вопросу о переработке береговых склонов водохранилищ // Труды института геологических наук. Сер. Инженерная геология. 1940. Вып. 23, № 2. С. 41–54.
23. Поляков Б.В. Гидрогеологический режим водохранилищ. // Сборник Нижне-Волгпроекта. Вып. VIII. М.: ОНТИ, 1938. С. 16–21.
24. Пышкин Б.А. Вопросы динамики берегов водохранилищ. Киев: Изд-во АН УССР, 1963. 331 с.
25. Самохвалова М.П. К вопросу прогноза переработки берегов Сталинградского водохранилища на участках хвалынской террасы //Труды Лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР. 1961. Т. 35. С. 123–132.

Поступила в редакцию / Received 24.11.2025
Принята к публикации / Accepted 05.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Степанова Мария Владимировна, аспирант, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия, https://orcid.org/0009-0009-4917-5649, SPIN: 5299-8443, e-mail: Stepanova-mariya2702@yandex.ru.

Экзарьян Владимир Нишанович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой, профессор, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия, https://orcid.org/0000-0003-3961-8003, SPIN: 7968-3231, e-mail: vnekzar@rambler.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maria V. Stepanova, postgraduate student, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia, https://orcid.org/0009-0009-4917-5649, SPIN: 5299-8443, e-mail: Stepanova-mariya2702@yandex.ru.

Vladimir N. Ekzaryan, D.Sc. (Geology and Mineralogy), Head of the Department, Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia, https://orcid.org/0000-0003-3961-8003, SPIN: 7968-3231, e-mail: vnekzar@rambler.ru.