

УДК 550.34.013.2:551.2 (479-924.73)

DOI: 10.46698/h7016-4168-8521-y

Оригинальная статья

## Трехмерные геоэкологические модели при прогнозировании уровня моря на Черноморском побережье Кавказа

И.Ю. Матасова <sup>1</sup>, Н.А. Яицкая <sup>2</sup>, М.А. Модина <sup>1</sup>, В.С. Бригида <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Россия, 353924, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: semigorie@mail.ru, marishamodina@yandex.ru;

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр "Субтропический научный центр РАН", Россия, 354002, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, e-mail: yaitskayan@mail.ru, 1z011@inbox.ru

Статья поступила: 28.06.2024, доработана: 26.08.2024, принята к публикации: 06.09.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Изменение климата и связанные с ним экономические последствия усиливают геоэкологические риски вдоль Черноморского побережья Кавказа, при этом особенно страдает субтропическая зона России. Хотя этот регион обладает большим потенциалом для развития пляжного туризма, здесь все чаще реализуются опасные гидрометеорологические явления высокой степени интенсивности. Для обеспечения устойчивого развития прибрежной инфраструктуры и реализации эффективных мер по защите береговой линии важно точно прогнозировать межгодовую изменчивость и экстремальные колебания уровня Черного моря. **Цель исследований** – совершенствование методов формирования трехмерных геоэкологических моделей при прогнозировании уровня моря на Черноморском побережье Кавказа. **Методика исследований** заключалась в использовании комплексного подхода, объединяющегося в анализе существующей литературы с данными Единой государственной информационной системы для создания базы данных уровня Черного моря (по посту г. Сочи). Значения уровня моря статистически обрабатывались и дополнялись с помощью трехмерной интерполяции. Формирование трехмерных моделей осуществлялось в программе Gnuplot, а регрессионных моделей (для двумерной постановки задачи) – в MS Excel методом наименьших квадратов. **Результатами исследования** стала разработка авторского подхода к обработке долгосрочных временных рядов данных, позволяющего существенно видоизменить подходы к формированию трехмерных геоэкологических моделей. В результате установлено, что для каждого 1-го и 5-го года роста времени наблюдения с 1927 по 2017 гг. приводит к росту уровня Черного моря, по полиномиальному закону на 5,4 %. При этом большая часть из этого роста приурочена к последним 20-ти годам. Дальнейшие исследования следует вести в направлении эффективной интеграции авторского подхода в геостатистический анализ для совершенствования ГИС технологий.

**Ключевые слова:** повышение уровня моря, побережье Черного моря, 3D модели, временные ряды, изменение климата, глобальная эффективность использования ресурсов, сохранение, экологическая устойчивость, водные экосистемы, водные ресурсы.

**Для цитирования:** Матасова И.Ю., Яицкая Н.А., Модина М.А., Бригида В.С. Трехмерные геоэкологические модели при прогнозировании уровня моря на Черноморском побережье Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 217-229. DOI: 10.46698/h7016-4168-8521-y

DOI: 10.46698/h7016-4168-8521-y

Original paper

## Three-dimensional geoecological models in forecasting sea level on Black Sea coast of Caucasus

I.Yu. Matasova <sup>1</sup>, N.A. Yaitskaya <sup>2</sup>, M.A. Modina <sup>1</sup>, V.S. Brigida <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Admiral Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossisk 353924, Russian Federation, e-mail: semigorie@mail.ru, marishamodina@yandex.ru;

<sup>2</sup> Federal Research Centre, Subtropical Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 2/28 Yana Fabriciusa Str., Sochi 354002, Russian Federation, e-mail: yaitskayan@mail.ru, 1z011@inbox.ru

Received: 28.06.2024, revised: 26.08.2024, accepted: 06.09.2024

**Abstract: Relevance.** Climate change and its associated economic consequences are intensifying geoecological risks along the Black Sea coast of the Caucasus, with the subtropical zone of Russia being particularly affected. Although this region has great potential for coastal tourism development, it is increasingly experiencing dangerous hydrometeorological phenomena of high intensity. To ensure sustainable development of coastal infrastructure and implement effective measures to protect the coastline, it is important to accurately predict inter-annual variability and extreme fluctuations in the Black Sea level. **The aim** of the research is to improve methods for forming three-dimensional geoecological models when forecasting sea levels on the Black Sea coast of the Caucasus. **The methods** involved using a comprehensive approach, combining the analysis of existing literature with data from the Unified State Information System to create a database of the Black Sea level (for the city Sochi post). Sea level values were statistically processed and supplemented using three-dimensional interpolation. The formation of three-dimensional models was carried out in the Gnuplot program, and regression models (for two-dimensional problem formulation) were created in MS Excel using the least squares method. **The research resulted** in the development of an author's approach to processing long-term time series data, which allows for a significant modification of approaches to the formation of three-dimensional geoecological models. As a result, it was established that for every 1st and 5th year, the increase in observation time from 1927 to 2017 leads to an increase in the Black Sea level, following a polynomial law, by 5.4%. Most of this growth is attributed to the last 20 years. Further research should be conducted in the direction of effective integration of the author's approach into geostatistical analysis for the improvement of GIS technologies.

**Keywords:** sea level rise, Black Sea coast, 3D models, time series, climate change, global resource efficiency, conservation, ecological Resilience, aquatic ecosystems, water resource.

**For citation:** Matasova I.Yu., Yaitskaya N.A., Modina M.A., Brigida V.S. Three-dimensional geoecological models in forecasting sea level on Black Sea coast of Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 217-229. DOI: 10.46698/h7016-4168-8521-y

### Введение

Последствия климатических изменений, наряду с неблагоприятными экономическими последствиями, обуславливают рост геоэкологических рисков вдоль Черноморского побережья Кавказа, особенно в субтропической зоне России [Бригида и др., 2020; Nuriev et al., 2023]. Эта территория имеет значительный потенциал

для развития пляжного туризма, при этом с каждым годом сталкиваясь с ростом частоты и масштабов негативных проявлений опасных гидрометеорологических процессов. Увеличение количества осадков и штормовых нагонов представляют угрозу не только прибрежным экосистемам и ценным рекреационным ресурсам, но и городской инфраструктуре в целом. Прогнозирование межгодовой динамики и экстремальных колебаний уровня Черного моря имеет решающее значение для разработки устойчивой инфраструктуры, а также берегоукрепительных и гидротехнических сооружений.

На современном этапе научного понимания природных процессов в геосредах используются разнообразные методы моделирования. При этом качество используемых данных, особенно для гидрологических задач, имеет первостепенное значение [Gutarevich et al., 2023; Karpov et al., 2024; Hristova, 2024]. Авторы отмечают, что повышение точности пространственного разрешения цифровой модели рельефа существенно увеличивает требуемую вычислительную мощность. В связи с этим, многие трехмерные гидродинамические модели водных объектов служат в первую очередь вспомогательным инструментом для специалистов-океанологов. Аналогичный сценарий наблюдается при оценке влияния климатических параметров холодного периода года на интенсификацию деформационных процессов в природно-технических системах [Klyuev et al., 2023; Sun et al., 2023]. Тем не менее, предпочтение двумерной постановке распространяется на более широкий круг задач, включая анализ протяженных временных рядов данных, несмотря на потенциальные преимущества многомерных моделей [Zaalishvili et al., 2022; Rezanov et al., 2022; Dzhioeva, 2022]. Например, для прогнозирования сезонной и межгодовой изменчивости уровня Черного моря продолжают определять характеристики линейных трендов с использованием двумерных моделей. При этом использование метода «Autoregression of the integrated moving average» (ARIMA) сопряжено с получением около 15,92% ошибок модельных данных [Zaalishvili et al., 2022]. В географических задачах подобные вопросы решаются в трехмерной постановке с использованием ГИС-технологий на основе стохастических методов (гауссовских процессов). Кроме алгоритмов «крикинга», для трехмерной интерполяции используется метод «взвешивания по обратному расстоянию» (IDW) или сплайновая интерполяция. Бурный рост использования методов машинного обучения, например нейронных сетей, начался относительно недавно. В то же время, обоснованность их применения требует более тщательного изучения [Viktorov, Gibadullin, 2023; Pavlov et al., 2024].

Одной из отличительных характеристик процессов протекающих в геосредах является сложное взаимодействие изменений различных масштабов в сочетании с цикличностью и нелинейностью характера их проявлений. Несмотря на развитие отдельных методов моделирования, сохраняются серьезные проблемы, особенно в вопросах геодинамического районирования и локализации сейсмически опасных зон. Метод ближайшего соседа («Nearest Neighbor») успешно используется для изучения изменчивости и различий афтершоков при декластеризации пространственно-распределенных рассеянных данных. В области материаловедения, при оценке механохимических процессов успешно применяется сплайновая интерполяция [Efremkov, Shanin, 2023; Mhanna, Hussein et al., 2024].

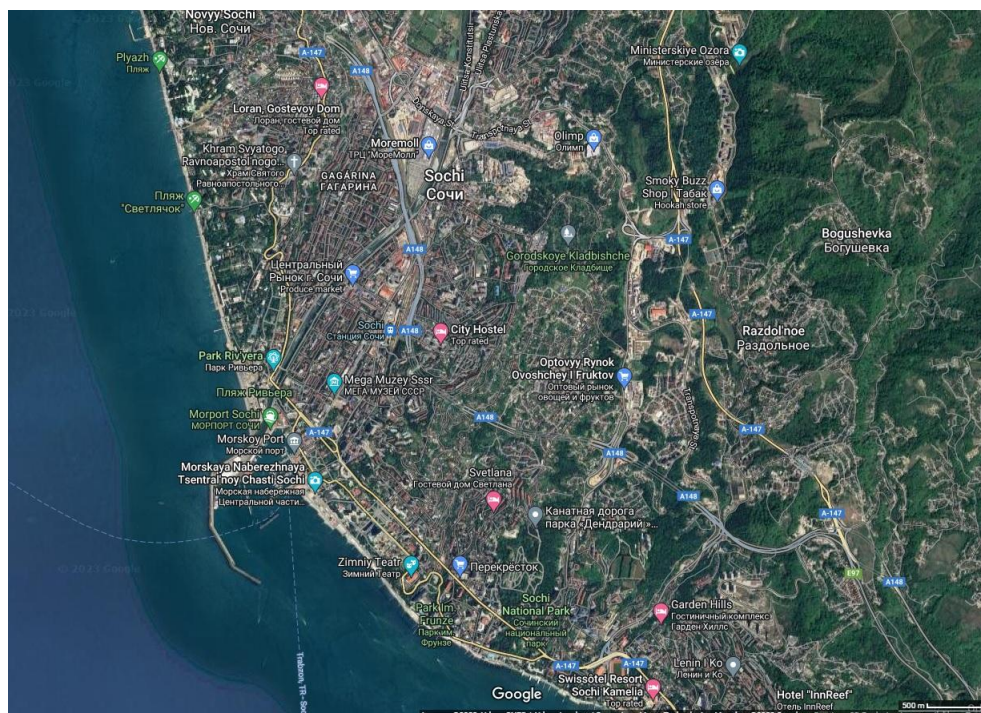
Если подходы к моделированию волнового климата морей достаточно развиты и освящены, влияние фактора межгодовой и внутригодовой изменчивости остается

не до конца изученным. Помимо простого затопления и разрушения территорий, повышение уровня моря является одним из факторов, который в значительной степени влияет на увеличение энергетического потенциала штормов. Чем больше глубина на подходе к берегу, тем меньше влияние рефракции волн и тем мощнее волны, ударяющиеся о берег. Полевые исследования показывают, что наибольшей продуктивностью для пляжного туризма (по ширине) обладают только около 10,38% от всей береговой линии г. Сочи. Кроме того, 54,92% береговой линии представляют собой пляжи с низкой продуктивностью (шириной менее 20 метров), что обуславливает необходимость приложения значительных усилий в области строительства новых берегоукрепительных гидротехнических сооружений. В этой связи совершенствование методологии прогнозирования уровня Черного моря, как основы для доказательства существования негативных проявлений климатических изменений на Черноморском побережье Кавказа, является важной научной задачей.

Цель работы – совершенствование методов формирования трехмерных геоэкологических моделей при прогнозировании уровня моря на Черноморском побережье Кавказа. Для ее достижения решались следующие задачи: оценка межгодовой динамики уровня Черного моря в двумерной постановке задачи; разработка трехмерных статистических моделей изменчивости уровня Черного моря.

### Методы исследования

Объект исследования – наблюдательная станция, расположенная в г. Сочи. ( $43^{\circ}34'38.2$  N  $39^{\circ}43'12.0$  E, рис. 1).



*Рис. 1. Расположение измерительного поста ( $43.577287$ ,  $39.720004$  Copyright © Google Earth) /*

*Fig. 1. Location of measuring post ( $43.577287$ ,  $39.720004$  Copyright © Google Earth)*

В основе работы применен комплексный подход включающий: анализ литературных источников; формирование базы данных об уровне Черного моря (район



г. Сочи) на основе Единой государственной системы информации; использование трехмерной интерполяции для статистической обработки значений уровня моря в ПО «gnuplot» [Ma et al., 2024; Malyukova et al., 2023] использование метода наименьших квадратов для построения регрессионных моделей в MS «Excel» [Brigida, Zinchenko, 2014; Конгар-Сюрюн, Ковальский, 2023].

### Результаты работы и их обсуждение

*Оценка межгодовой динамики уровня Черного моря в двумерной постановке задачи.*

Климатические изменения и их влияние на трансформацию природных процессов в геосредах с трудом поддаются упрощению в виде двумерной постановки задачи. Хронологический ход уровня моря по посту Сочи в виде графика рассеянных данных, начиная с 1926 г. представлен на рис. 2.

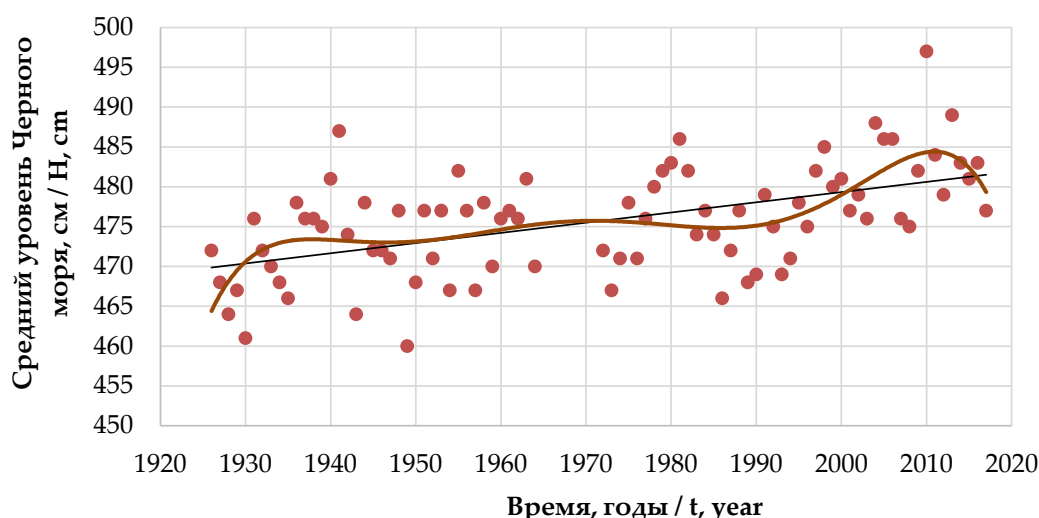


Рис. 2. Хронологический ход среднего уровня Черного моря по данным Сочинского поста (1925–2017 гг.) и его линейный и полиномиальный тренды /

Fig. 2. Chronological course of average level of the Black Sea according to the Sochi post (1925–2017) and its linear and polynomial trends

Параметры и общий вид формул для линейного и полиномиального (6 степени) видов регрессионных моделей приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

#### Параметры регрессии / Regression parameters

| R <sup>2</sup> | Формула / Formula  |     |
|----------------|--|-----|
| 0,3596         | $H = -7E - 09t^6 + 8E - 05t^5 - 0,3918t^4 + 1029,2t^3 - 2E + 06t^2 + 1E + 09t - 4E + 11$ | (1) |
| 0,2769         | $H = 0,1278t + 223,72$   | (2) |

Анализ коэффициентов детерминации в таблице 1 показывает, что традиционный подход двумерных временных рядов недостаточно представительно отражает динамику изменения уровня моря. Однако данные ясно показывают линейное повышение уровня моря, особенно заметное с 1980-х годов. Для повышения точности и надежности полученных моделей, методология исследования подразумевала разделение всего набора данных на пятилетние сегменты (где m – номер года внутри

пятилетних интервалов;  $N$  – номер пятилетнего интервала, при разбиении всего временного ряда начиная с 1927 г.). Например, 1932 год имеет параметры:  $m = 1$ ;  $N = 2$  (то есть он является первым по счету годом во втором пятилетнем интервале). Свертка временного ряда, таким образом, позволит представить двумерный массив данных в виде трехмерной структуры.

*Трехмерные статистические модели изменчивости уровня Черного моря.* Основой исследований являлись данные (начиная с 1927 г.) по замерному посту г. Сочи. Для оценки динамики временного ряда в простейшем случае к стандартной задаче применялась попарная оценка по критерию «качество-надежность» («goodness-of-fit»). Качество моделей определялось по углу отклонения линейного тренда от стандартной оптимальной линии на квартильно-четвертных графиках остаточного анализа (Q-Q диаграмм). Авторский подход заключался в том, чтобы оценить качество сплайн-подгонки поверхности отклика к интерполированным данным в зависимости от типа алгоритма интерполяции (Watson, Akima или Renka) и сравнить его с базовым случаем. Разделение временного ряда на пятилетние интервалы позволило ввести новый параметр (количество интервалов) и сформировать трёхмерную модель («базовый вариант» рис. 3б). После проведения попарных сравнений с использованием Q-Q диаграмм и «анализа остатков» наиболее качественная модель была достигнута при использовании алгоритма R. Renka (рис. 3а).

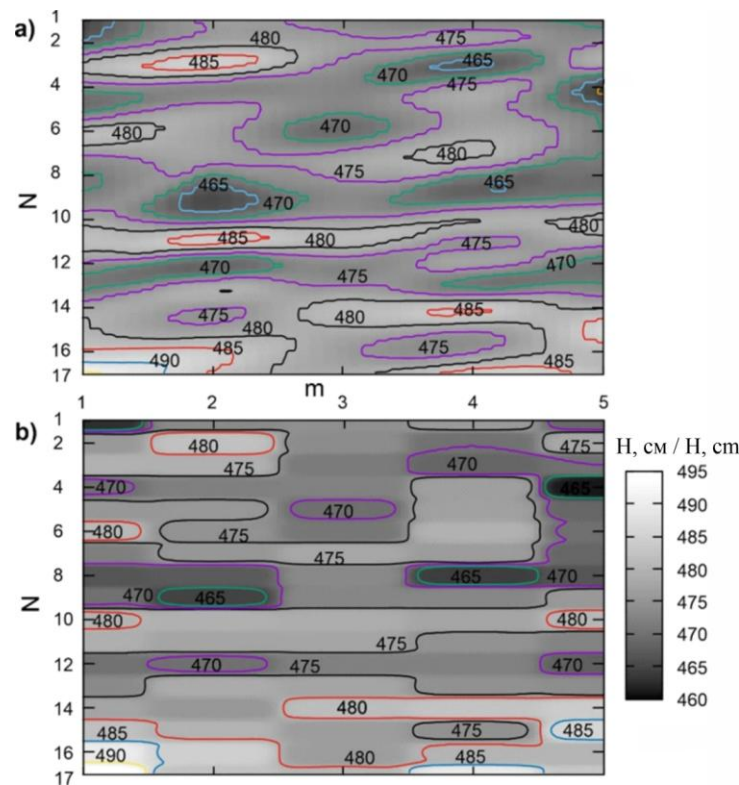


Рис. 3. Проекция динамики уровня Черного моря:  $m$  – номер года внутри пятилетнего интервала;  $N$  – номер пятилетнего интервала; а) – сплайн-аппроксимация поверхности по интерполированным данным по процедуре Р. Ренка, б) – сплайн-аппроксимация «базовый вариант» /

Fig. 3. Projection of Black Sea level dynamics:  $m$  – year number within a five-year interval;  $N$  – five-year interval number; а) – spline approximation of the surface according to interpolated data according to the R. Renka procedure, б) – spline approximation “basic version”

Из анализа рис. 3 следует, что, начиная с 1927 г. (первого года,  $m = 1$ ,  $N = 1$ ) по 2017 г. прослеживалось 17 пятилетних интервалов. Из сравнения проекций поверхности отклика следует, что более сфокусированные очертания площадей локальных экстремумов обуславливают лучшее представление исследованных процессов по сравнению с базовым случаем. Геометрическое представление наиболее представительной модели показано на рис. 4.

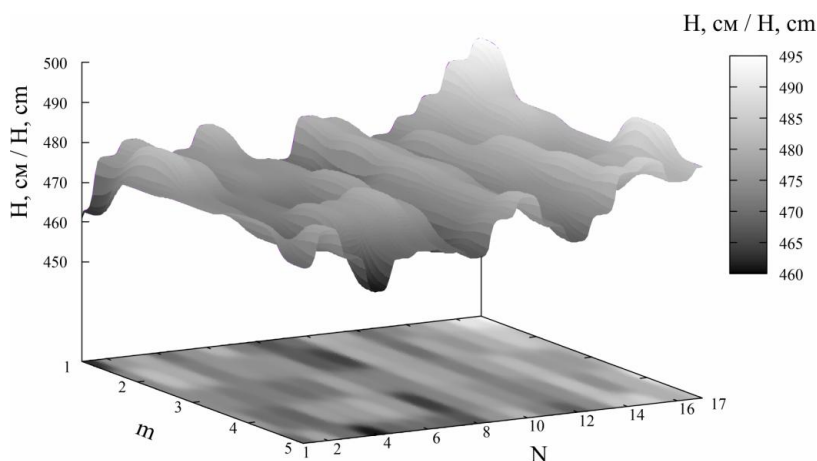


Рис. 4. Модель межгодовой цикличности уровня моря в трехмерной постановке задачи /  
 Fig. 4. Model of interannual sea level cyclicity in a three-dimensional problem statement

Исходя из анализа поверхности отклика представленной на рис. 4. следует, что характер поверхности вдоль значений  $m = 1$  и 5 явно свидетельствует о восходящей тенденции уровня Черного моря (рис. 5).

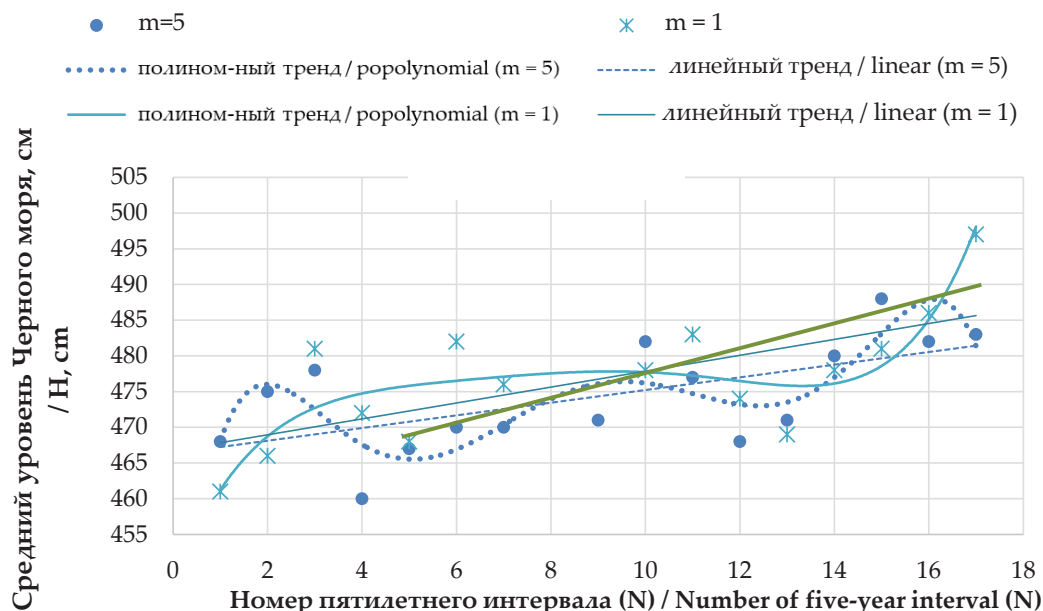


Рис. 5. Модель межгодовой цикличности крайних проекций пятилетних интервалов временного ряда /  
 Fig. 5. Model of interannual cyclicity of edge projections of five-year time series intervals

Параметры и общий вид формул для линейного и полиномиального (6 степени) видов регрессионных моделей приведены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

**Параметры регрессии для трехмерной постановки задачи /  
Regression parameters for three-dimensional formulation problem**

| m | R <sup>2</sup> | Формула / Formula   |     |
|---|----------------|---|-----|
| 1 | 0,4457         | $H = 1,1137t + 466,7$   | (3) |
|   | 0,7923         | $H = -0,0003t^6 + 0,0156t^5 - 0,3385t^4 + 3,5312t^3 - 18,476t^2 + 46,628t + 428,47$ | (4) |
| 5 | 0,3842         | $H = 0,8862t + 466,34$  | (5) |
|   | 0,677          | $H = -0,0005t^6 + 0,0286t^5 - 0,5956t^4 + 5,9454t^3 - 28,891t^2 + 60,995t + 430,66$ | (6) |

Исходя из анализа коэффициентов детерминации из табл. 2. следует, что рассмотрение пятилетних интервалов протяженных временных рядов приводит к росту коэффициентов детерминации линейных и полиномиальных моделей. При этом уровень R<sup>2</sup> достаточен ( $\geq 0,7$ ) для обеспечения статистической достоверности полиномиальных моделей. Кроме того, рост тангенса угла наклона линейных трендов (при условии трехмерной постановки задачи) довольно существенен (0,89 и 1,11) по сравнению со значением 0,13 для двумерной задачи.

Представленный пример динамики уровня моря для всех значений  $m=3$  (смотри зеленую линию тренда на рис. 5) представлен для «середины» общей модели. Ее общие закономерности имеют подобные черты с кривыми краевых значений (то есть для  $m=1$  и  $m=5$ ), начиная с шестого пятилетнего интервала.

Результаты моделирования, для двумерной постановки задачи (смотри рис. 2), подобны результатам, которые получены для Испанского Средиземноморья и Китайских морей [Cheng et al., 2016; Malozyomov et al., 2023]. Такой же подход по сегментации временных рядов данных по четырем мареографам (Aden, Karachi, Mumbai, and Fremantle) использован в работе [Boretti, 2020]. В подобных работах, как и в нашем случае, линейные тренды используются для первичного определения общих закономерностей динамики исследуемых процессов или служат основой для калибровки при использовании различных алгоритмов обработки данных. При применении диаграмм Тейлора можно получить качественно иные результаты моделирования [Li et al., 2024]. В другом подобном исследовании [Azran et al., 2023; Bryukhanova et al., 2024], только 4 модели были взяты за основу для формирования среднего уровня моря (Малайзия). Дальнейший пространственный анализ приведен в виде картографического распределения уровня моря вдоль побережья, что не позволяет оценить степень достоверности полученных результатов в конкретной точке.

Наиболее близким аналогом авторского подхода для двумерной постановки задачи является «интегрированная модель авторегрессии скользящего среднего» (ARIMA) [Anwar et al., 2022; Yang et al., 2023b]. Так при анализе уровня приливов на станции Cox's Bazar (Бангладеш) его успешно применяли для заполнения пустот рассеянных данных. После чего использовался алгоритм «полного ансамблевого разложения по эмпирическому моду» (CEEMD) для получения обобщенного тренда. Следует отметить хорошее качество сглаживания данных, для данного подхода, но полученные регрессии обладают худшей прогностической способностью



по критериям «goodness-of-fit». Метод СЕЕМД в сочетании с использованием нейронных сетей может устранить данный недостаток [Yang et al., 2023a]. Также довольно близким к результатам исследования является использование моделей множественной регрессии с проверкой качества полученных результатов посредством формирования Q-Q графиков. Тем не менее, и в данном исследовании в некоторых точках замера (Pensacola, Флорида) модельные данные имеют существенный разброс значений.

Основным подходом к формированию трехмерных статистических моделей в виде пространственных изменений уровня моря на основе ретроспективного анализа данных является использование ГИС технологий. Основным недостатком работы является использование стохастических алгоритмов интерполяции (крикинга). Ее суть заключается в сложности оценки итоговых моделей, когда интерполянт проходит через экспериментальные точки. Более представительным, по сравнению со стандартными методами геостатистики, выглядит метод Вейвлет-преобразования (*Wavelet analysis*). Наши результаты проекций трёхмерных статистических моделей (смотри рис. 3.) подобны моделям месячных изменений MSLA («monthly mean sea level anomaly») в системе Канарских течений [Marrero-Betancort et al., 2023]. При этом использованная, в нашем случае, свертка временного ряда может быть эффективно интегрирована в более совершенные и масштабные модели. Например, служить заменой менее представительного гармонического анализа временных рядов.

Высокий уровень роста, по сравнению с европейскими исследованиями, по-видимому, связан с высокой геодинамической активностью на Кавказе, которая сопряжена с опусканием некоторых участков береговой линии. Во многих палеогеографических исследованиях [Кизилев, 2023] указывается, что многие крепости на Черноморском побережье Кавказа подверглись затоплению. Например, палеорекострукция крепостей Пицунды [Trebeleva et al., 2021] указывает на ее фактическое частичное затопление, что является косвенным доказательством более высокого роста уровня Черного моря по сравнению с теоретическими моделями.

## Выводы

Учитывая негативные последствия глобального изменения климата, технологического влияния и усиления эрозии из-за повышения уровня моря, крайне важно как на государственном уровне, так и на региональном уровне решать вопросы комплексной защиты береговой линии от эрозии. Это имеет решающее значение для сохранения и приумножения рекреационного потенциала субтропического побережья Кавказа. Выполненные исследования показывают, что при рассмотрении динамики уровня Черного моря в трехмерной постановке задачи обеспечивается рост коэффициентов детерминации полиномиальных регрессионных моделей до статистически значимого уровня. Кроме того, использование интерполяционного алгоритма R. Renka позволяет обеспечить большую надежность моделей, в которых изоповерхности локальных экстремумов обуславливают лучшее представление исследованных процессов. В результате удалось установить, что для краевых значений пятилетних интервалов (то есть для каждого 1-го и 5-го года) рост времени за столетний период (с 1927 по 2017 гг.) приводит к росту уровня Черного моря, по полиномиальному закону на 5,4 %. При этом большая доля роста прослеживается с 13-го по 15-й пятилетний интервал, или за последние 20 лет.

## Литература

1. Бригида В.С., Мишулина С.И., Стась Г.В. Перспективные направления экологизации структурных элементов туристского продукта краснодарского края (на примере транспортной составляющей). // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – Т. 12. № 1. – С. 24–25. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-18-25.
2. Кизилов А.С. Древние крепости и поселения Черноморского и Каспийского побережий Кавказа: некоторые вопросы локализации, идентификации и сохранности. // История, археология и этнография Кавказа. – 2023. – Т. 19. – №. 3. – С. 743–758. DOI: 10.32653/СН193743-758.
3. Конгар-Сюрюн Ч.Б., Ковальский Е.Р. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряжённо-деформированное состояние массива. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. Т. 13. № 4. – С. 177–187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014.
4. Anwar M.S., Rahman K., Bhuiyan M.A.E., Saha R. Assessment of Sea Level and Morphological Changes along the Eastern Coast of Bangladesh. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – Art. No. 527. DOI: 10.3390/jmse10040527.
5. Azran N.I., Jeofry H., Chung J.X., Juneng L., Ali S.A.S., Griffiths A., Ramli M.Z., Ariffin E.H., Miskon M.F., Mohamed J., et al. Southern South China sea dynamics: sea level change from coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) in the 21st Century. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – Art. No. 458. DOI: 10.3390/jmse11020458.
6. Boretti A. Analysis of Segmented Sea level Time Series. // Applied Sciences. –2020. – Vol. 10. – Art. No. 625. DOI: 10.3390/app10020625.
7. Brigida V.S., Zinchenko N.N. Methane release in drainage holes ahead of coal face. // Journal of Mining Science. – 2014. – Vol. 50. No. 1. – pp. 60–64. DOI: 10.1134/s1062739114010098.
8. Bryukhanova N.N., Kondratiev V.V., Kononenko R.V., Pavlov P.P., Romanova V.V., Karlina Y.I. Reliability study of metal-oxide semiconductors in integrated circuits. // Micromachines. – 2024. – Vol. 15. – Art. No. 561. DOI: 10.3390/mi15050561.
9. Cheng Y., Ezer T., Hamlington B.D. Sea level acceleration in the China Seas. // Water. – 2016. – Vol. 8. – Art. No. 293. DOI: 10.3390/w8070293.
10. Dzhioeva A.K. Prospects for mining ecologization to reduce harmful emissions into the atmosphere. // Ugol. – 2022. – No. 10. – pp. 29–32. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-29-32.
11. Efremenkov E.A., Shanin S.A. Development of an algorithm for computing the force and stress parameters of a cycloid reducer. // Mathematics. – 2023. – Vol. 11. – Art. No. 993. DOI: 10.3390/math11040993.
12. Gutarevich V.O., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Kukartsev V.A., Kukartsev V.V., Iushkova L.V., Korpacheva L.N. Reducing oscillations in suspension of mine monorail track. // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – Art. No. 4671. DOI: 10.3390/app13084671.
13. Hristova T. Tracking mining company electric vehicles for sustainable development optimization using distributed ledger technologies. // Journal of Sustainable Mining. – 2024. – Vol. 23. No. 3. – pp. 299–314. DOI: 10.46873/2300-3960.1425.
14. Karpov D.F., Vafaeva K.M., Pavlov M.V., Dixit S., Ravikanth P., Nautiyal R.D., Punia A., Madan P. Parametric analysis of a radiant gas heating system for controlled-environment agriculture with preheated ventilation. // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 511. – Art. No. 01010. DOI: 10.1051/e3sconf/202451101010.
15. Klyuev R.V., Brigida V.S., Lobkov K.Y., Stupina A.A., Tynchenko V.V. On the issue of monitoring crack formation in natural-technical systems during earth surface displacements. // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2023. – Vol. Nos. 11-1. – pp. 292–304. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_111\_0\_292.
16. Li X., Li L., Yan F., Qi C., Guzev M.A., Kozhevnikov E.V., Kunitskikh A.A. An analytical solution of direction evolution of crack growth during progressive failure in brittle rocks. // Deep Underground Science and Engineering. Portico. – 2024. DOI: 10.1002/dug2.12117.

17. Ma L., Ghorbani Y., Kongar-Syuryun C.B., Khayrutdinov M.M., Klyuev R.V., Petenko A. Dynamics of backfill compressive strength obtained from enrichment tails for the circular waste management. // *Resources, Conservation & Recycling Advances*. – 2024. – Vol. 23. – Art. No. 200224. DOI: 10.1016/j.rcradv.2024.200224.

18. Malozyomov B.V., Khalikov I.H., Kukartsev V.A. Review of methods for improving the energy efficiency of electrified ground transport by optimizing battery consumption. // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – No. 2. – Art. No. 729. DOI: 10.3390/en16020729.

19. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Y., Bashmur K.A., Panfilova T.A. Circular Mining Wastes management for sustainable production of camellia sinensis (L.) O. Kuntze. // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – Art. No. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.

20. Marrero-Betancort N., Marcello J., Rodríguez-Esparragón D., Hernández-León S. Sea level change in the canary current system during the satellite era. // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 10. – Art. No. 936. DOI: 10.3390/jmse10070936.

21. Mhanna M., Hussein H.H. Analysis of squeezing-induced failure in a water tunnel and measure of rehabilitation: A case study of Tishreen tunnel, Syria. // *Deep Underground Science and Engineering*. Portico. – 2024. DOI: 10.1002/dug2.12120.

22. Nuriev M., Zaripova R., Sitnikov S., Nurgaliev R. The principles of building a parallel program for steganographic file protection. // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 458. – Art. No. 09027. DOI: 10.1051/e3sconf/202345809027.

23. Pavlov M.V., Vafaeva K.M., Karpov D.F., Dixit S., Kumar P., Joshi A., Mishra R., Brar M. Impact of environmental factors on indoor air temperature in gas-fired radiant heated cultivated structures. // *E3S Web of Conferences*. – 2024. – Vol. 511. – Art. No. 01036. DOI: 10.1051/e3sconf/202451101036

24. Rezanov V.A., Kukartsev V.V., Tynchenko V.S., Kukartsev V.A., Grinek A.V., Skeebe V.Y., Lyosin A.V., Karlina A.I. Study of melting methods by electric resistance welding of rails. // *Metals*. – 2022. – Vol. 12. – Art. No. 2135. DOI: 10.3390/met12122135.

25. Sun J., Huang Y., He Y., Andrii B., Liu W. Properties of macadam stabilized with cement and asphalt emulsion. // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. No. 23. – Art. No. 7256. DOI: 10.3390/ma16237256.

26. Trebeleva G., Glazov K., Kizilov A., Sakania S., Yurkov V., Yurkov G. Roman fortress pituit: 3D-reconstruction of the monument based on the materials of archaeological research and geological paleoreconstructions. // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11. No. 11. – Art. No. 4814. DOI: 10.3390/app11114814.

27. Viktorov I., Gibadullin R. The principles of building a machine-learning-based service for converting sequential code into parallel code. // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 431. – Art. No. 05012. DOI: 10.1051/e3sconf/202343105012.

28. Yang S., Bieliatynskiy A., Trachevskiy V., Shao M., Ta M. Research of nano-modified plain cement concrete mixtures and cement-based concrete. // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2023b. – Vol. 17. No. 1. DOI: 10.1186/s40069-023-00601-8.

29. Yang Y., Cheng Q., Tsou J.-Y., Wong K.-P., Men Y., Zhang Y. Multiscale analysis and prediction of sea level in the northern south china sea based on tide gauge and satellite data. // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023a. – Vol. 11. – Art. No. 1203. DOI: 10.3390/jmse11061203.

30. Zaalishvili V., Burdzieva O., Kanukov A., Zaks T. Eco-Geophysical and Republic of North Ossetia-Alania. // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – Art. No. 2644. DOI: 10.3390/app12052644.

## References

1. Brigida V.S., Mishulina S.I., Stas G.V. Perspective directions of “ecologisation” of structural elements of a tourist product of Krasnodar region (case study of transportation

component). Sustainable Development of Mountain Territories. 2020. Vol. 12. No. 1. pp. 18–25. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-18-25. (In Russ.)

2. Kizilov A.S. Ancient fortresses and settlements along the Black sea and Caspian coasts of the Caucasus: localization, identification, and preservation challenges. History, Archeology and Ethnography of the Caucasus. 2023. Vol. 19. No. 3. pp. 743–758. DOI: 10.32653/CH193743-758. (In Russ.)

3. Kongar-Syuryun Ch.B., Kovalski E.R. Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 177–187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014. (In Russ.)

4. Anwar M.S., Rahman K., Bhuiyan M.A.E., Saha R. Assessment of Sea Level and Morphological Changes along the Eastern Coast of Bangladesh. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. Art. No. 527. DOI: 10.3390/jmse10040527.

5. Azran N.I., Jeofry H., Chung J.X., Juneng L., Ali S.A.S., Griffiths A., Ramli M.Z., Ariffin E.H., Miskon M.F., Mohamed J., et al. Southern South China sea dynamics: sea level change from coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) in the 21st Century. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11. Art. No. 458. DOI: 10.3390/jmse11020458.

6. Boretti A. Analysis of segmented sea level time series. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Art. No. 625. DOI: 10.3390/app10020625.

7. Brigida V.S., Zinchenko N.N. Methane release in drainage holes ahead of coal face. *Journal of Mining Science*. 2014. Vol. 50. No. 1. pp. 60–64. DOI: 10.1134/s1062739114010098.

8. Bryukhanova N.N., Kondratiev V.V., Kononenko R.V., Pavlov P.P., Romanova V.V., Karlina Y.I. reliability study of metal-oxide semiconductors in integrated circuits. *Micromachines*. 2024. Vol. 15. Art. No. 561. DOI: 10.3390/mi15050561.

9. Cheng Y., Ezer T., Hamlington B.D. Sea level acceleration in the China Seas. *Water*. 2016. Vol. 8. Art. No. 293. DOI: 10.3390/w8070293.

10. Dzhioeva A.K. Prospects for mining ecologization to reduce harmful emissions into the atmosphere. *Ugol*. 2022. No. 10. pp. 29–32. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-29-32.

11. Efremkov E.A., Shanin S.A. Development of an algorithm for computing the force and stress parameters of a cycloid reducer. *Mathematics*. 2023. Vol. 11. Art. No. 993. DOI: 10.3390/math11040993.

12. Gutarevich V.O., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Kukartsev V.A., Kukartsev V.V., Iushkova L.V., Korpacheva L.N. Reducing oscillations in suspension of mine monorail track. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Art. No. 4671. DOI: 10.3390/app13084671.

13. Hristova T. Tracking mining company electric vehicles for sustainable development optimization using distributed ledger technologies. *Journal of Sustainable Mining*. 2024. Vol. 23. No. 3. pp. 299–314. DOI: 10.46873/2300-3960.1425.

14. Karpov D.F., Vafaeva K.M., Pavlov M.V., Dixit S., Ravikanth P., Nautiyal R.D., Punia A., Madan P. Parametric analysis of a radiant gas heating system for controlled-environment agriculture with preheated ventilation. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 511. Art. No. 01010. DOI: 10.1051/e3sconf/202451101010.

15. Klyuev R.V., Brigida V.S., Lobkov K.Y., Stupina A.A., Tynchenko V.V. On the issue of monitoring crack formation in natural-technical systems during earth surface displacements. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023. Vol. Nos. 11-1. pp. 292–304. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_111\_0\_292.

16. Li X., Li L., Yan F., Qi C., Guzev M.A., Kozhevnikov E.V., Kunitskikh A.A. An analytical solution of direction evolution of crack growth during progressive failure in brittle rocks. *Deep Underground Science and Engineering*. Portico. 2024. DOI: 10.1002/dug2.12117.

17. Ma L., Ghorbani Y., Kongar-Syuryun C.B., Khayrutdinov M.M., Klyuev R.V., Petenko A. Dynamics of backfill compressive strength obtained from enrichment tails for the circular waste management. *Resources, Conservation & Recycling Advances*. 2024. Vol. 23. Art. No. 200224. DOI: 10.1016/j.rcradv.2024.200224.



18. Malozyomov B.V., Khalikov I.H., Kukartsev V.A. Review of methods for improving the energy efficiency of electrified ground transport by optimizing battery consumption. *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 2. Art. No. 729. DOI: 10.3390/en16020729.
19. Malyukova L.S., Martyshev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Y., Bashmur K.A., Panfilova T.A. Circular mining wastes management for sustainable production of *camellia sinensis* (L.) O. Kuntze. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Art. No. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.
20. Marrero-Betancort N., Marcello J., Rodríguez-Esparragón D., Hernández-León S. Sea level change in the canary current system during the satellite era. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 10. Art. No. 936. DOI: 10.3390/jmse10070936.
21. Mhanna M., Hussein H.H. Analysis of squeezing-induced failure in a water tunnel and measure of rehabilitation: A case study of Tishreen tunnel, Syria. *Deep Underground Science and Engineering*. Portico. 2024. DOI: 10.1002/dug2.12120.
22. Nuriev M., Zaripova R., Sitnikov S., Nurgaliev R. The principles of building a parallel program for steganographic file protection. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 458. Art. No. 09027. DOI: 10.1051/e3sconf/202345809027.
23. Pavlov M.V., Vafaeva K.M., Karpov D.F., Dixit S., Kumar P., Joshi A., Mishra R., Brar M. Impact of environmental factors on indoor air temperature in gas-fired radiant heated cultivated structures. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 511. Art. No. 01036. DOI: 10.1051/e3sconf/202451101036
24. Rezanov VA., Kukartsev V.V., Tynchenko V.S., Kukartsev V.A., Grinek A.V., Skeebe V.Y., Lyosin A.V., Karlina A.I. Study of melting methods by electric resistance welding of rails. *Metals*. 2022. Vol. 12. Art. No. 2135. DOI: 10.3390/met12122135.
25. Sun J., Huang Y., He Y., Andrii B., Liu W. Properties of macadam stabilized with cement and asphalt emulsion. *Materials*. 2023. Vol. 16. No. 23. Art. No. 7256. DOI: 10.3390/ma16237256.
26. Trebeleva G., Glazov K., Kizilov A., Sakania S., Yurkov V., Yurkov G. Roman fortress pitium: 3D-reconstruction of the monument based on the materials of archaeological research and geological paleoreconstructions. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. No. 11. Art. No. 4814. DOI: 10.3390/app11114814.
27. Viktorov I., Gibadullin R. The principles of building a machine-learning-based service for converting sequential code into parallel code. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 431. Art. No. 05012. DOI: 10.1051/e3sconf/202343105012.
28. Yang S., Bieliatynskiy A., Trachevskiy V., Shao M., Ta M. Research of nano-modified plain cement concrete mixtures and cement-based concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2023b. Vol. 17. No. 1. DOI: 10.1186/s40069-023-00601-8.
29. Yang Y., Cheng Q., Tsou J.-Y., Wong K.-P., Men Y., Zhang Y. Multiscale analysis and prediction of sea level in the northern south china sea based on tide gauge and satellite data. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023a. Vol. 11. Art. No. 1203. DOI: 10.3390/jmse11061203.
30. Zaalishvili V., Burdzieva O., Kanukov A., Zaks T. Eco-Geophysical and geocological factors in assessing the state of the geological environment based on the analysis of spatial databases of the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Art. No. 2644. DOI: 10.3390/app12052644.