

УДК 504.61+502.52

DOI: [10.46698/VNC.2022.86.27.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.86.27.012)

Оригинальная статья

## Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных

Н. А. Яицкая , В. С. Бригида 

Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр  
Российской академии наук», Россия, 354002, Краснодарский край,  
г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 2/28, e-mail: 1z011@inbox.ru

Статья поступила: 09.01.2022, доработана: 14.02.2022, принята к публикации: 23.02.2022

**Резюме: Актуальность работы.** Наличие комплексного влияния нескольких антропогенных факторов горного производства, а также обусловленные ими нелинейности протекания геомеханических и аэрогазовых процессов в техногеннонарушенном массиве горных пород актуализируют широкий перечень геоэкологических проблем обеспечения устойчивого развития территорий Юга России. Наличие ряда ограничений в методологии проведения геопространственного анализа при решении трехмерных задач геоэкологии не позволяет до конца раскрыть потенциал ГИС-технологий. В связи с недостаточной степенью качества оценки применения детерминированных методов определения пространственного распределения исследуемой переменной все большее распространение получают стохастические методы. При этом использование кригинга не всегда обеспечивает более надежные модели пространственного распределения поллютантов. **Цель исследований** – выявление перспективных направлений аппроксимации пространственных данных для обеспечения устойчивого развития территорий, за счет повышения качества геоэкологического мониторинга источников загрязнения природной среды. **Методика исследований** заключалась в сравнительном анализе методов пространственной интерполяции, обобщения теоретико-методологических подходов к оценке качества получаемых зависимостей на основе критериев «goodness-of-fit», а также использовании методов локально оцененного сглаживания рассеянных данных (в сочетании с методом конечных элементов) для повышения точности полученных моделей. В процессе решения задач были определены наиболее представительные критерии соответствия моделей экспериментальным данным, а также проведен анализ подходов к установлению зависимостей переменной от нескольких предикторов. **Результатами исследования** стало формирование авторского подхода к обработке трехмерных данных, позволяющего преодолеть основной недостаток детерминированных методов интерполяции геоэкологических данных при повышении качества получаемых геопространственных моделей. Кроме того, для оценки качества аппроксимации предложено использование  $Q-Q$  (квантиль-квантиль) графиков. Это позволяет оценить качество моделей по отношению к теоретически достижимой линии максимального соответствия моделируемых и опытных данных. Дальнейшие исследования следует вести в направлении перехода к  $Q-Q$  плоскостям, для формирования поверхности остатков (ошибок) при подборе моделей исследуемых процессов.

**Ключевые слова:** геостатистика, пространственная интерполяция, трехмерные задачи геоэкологии, геопространственный анализ, экологический мониторинг, устойчивая добыча полезных ископаемых, ГИС в горном деле.

**Для цитирования:** Яицкая Н. А., Бригида В. С. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (1): 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012.

## GEOINFORMATICS

DOI: [10.46698/VNC.2022.86.27.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.86.27.012)

Original paper

## Geoinformation technologies in solving three-dimensional geoeological problems. Spatial data interpolation

N. A. Yaitskaya , V. S. Brigida 

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

Received: 09.01.2022, revised: 14.02.2022, accepted: 23.02.2022

**Abstract: Relevance.** The presence of the complex influence of several anthropogenic factors of mining, as well as the nonlinearity of geomechanical and air-gas processes flow in the technogenically disturbed rock mass due to them, actualizes a wide list of geoeological problems of ensuring the sustainable development of the South of Russia territories. The presence of a number of limitations in the methodology of conducting geospatial analysis when solving three-dimensional problems of geoeology does not allow to fully reveal the potential of GIS technologies. Due to the insufficient degree of quality in assessing the application of deterministic methods for determining the spatial distribution of the variable under study, stochastic methods are becoming more widespread. Moreover, the use of cricking does not always provide more reliable models of pollutants spatial distribution. **The Aim** of the study is to identify promising directions for the approximation of spatial data to ensure sustainable development of territories by improving the quality to geoeological monitoring of environmental pollution sources. **The methods** consisted in a comparative analysis of spatial interpolation methods, generalization of theoretical and methodological approaches to assessing the quality of the obtained dependencies based on the “goodness-of-fit” criteria, as well as the use of locally estimated smoothing methods of scattered data (in combination with the finite element method) to improve the accuracy of the obtained models. In the process of solving the problems, the most representative criteria for matching models with experimental data were determined, and an analysis of approaches to determining the dependencies of a variable on several predictors was carried out. **Results** of the study were the formation of the author’s approach to the processing of three-dimensional data, which allows overcoming the main drawback of deterministic interpolation methods to geoeological data while improving the quality of the geospatial models obtained. In addition, the use Q-Q (quantile-quantile) graphs is proposed to assess the quality of models in relation to the theoretically achievable line of maximum correspondence between the simulated and experimental data. Further research should be conducted in the direction of transition to Q-Q planes, to form the surface of residues (errors) when selecting models of the processes under study.

**Keywords:** geostatistics, spatial interpolation, three-dimensional problems of geoeology, geospatial analysis, environmental monitoring, sustainable mining, GIS in mining.

**For citation:** Yaitskaya N.A., Brigida V.S. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geoeological problems. Spatial data interpolation. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2022. 12 (1): 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012.

### Введение

Доля горнорудной промышленности России в мировых масштабах добычи геоматериалов составляет 9,5% (от 5% для железных до 25% для калийных руд), при этом объемы отходов обогащения превышают 45 млрд т [Хайрутдинов и др., 2020]. В то же время антропогенное воздействие на биоценозы в результате техно-

генной трансформации окружающей природной среды неуклонно растет [Клюев и др., 2020; Рыльникова и др., 2017]. Только в процессе разработки нефелин-апатитовых руд Хибинского месторождения (Кольский полуостров) накопилось свыше 1,3 млрд т отвальных пород обогащения полиметаллического сырья, содержащих до 1,18 млн т редкоземельных металлов [Когарко, 2019]. После частичной отработки Садонского месторождения (Республика Северная Осетия-Алания) на территории Мизурской обогатительной фабрики сосредоточено около 2,5 млн м<sup>3</sup> отвальной массы с высоким содержанием Cu, Zn и Ni [Дребенштедт и др., 2018]. Переход к безотходной утилизации таких некондиционных запасов в виде инертных заполнителей для приготовления разнопрочных закладочных смесей позволяет частично смягчить экологическое влияние горного производства [Голик и др., 2015], а более совершенные технологии взрывной отбойки – снизить объемы накопления пустой породы [Комашенко и др., 2014]. В то же время качество оценок опасности и масштабов уже нанесенного вреда остается недостаточно изученным.

Реструктуризация и закрытие шахт, обрабатывающих глубокозалегающие газоносные угольные пласты, актуализировала вопросы оценки микроклиматических изменений, вызванных длительной эмиссией метана из подработанных территорий. Методические основы определения зональности ее распространения – естественной дегазации из нарушенного массива далеки от окончательного формирования [Качурин, 2021]. При этом половина от всех источников выделения метана в России приходится на добывающую промышленность, в отличие от большинства развитых стран, а общий вклад нашей страны в глобальную эмиссию достигает 7% [Saunois et al., 2016].

Усложнение математического аппарата, а также наличие специфических аспектов проведения геопространственного анализа составляют объективные сложности, которые можно преодолеть с использованием современных геоинформационных технологий [Zaalishvili et al., 2020b; Чотчаев и др., 2020]. Например, использование спутниковых снимков для получения цифровой модели рельефа в программах *QGIS* и *GRASS GIS* позволило выявить масштабы распределения загрязнения р. Левый Ул от освоения оловорудных месторождений Дальнего Востока [Усиков и др., 2019]. Выявлено, что результатом пятилетнего роста хвостохранилища Многовершинного обогатительного комбината (Хабаровский край), явилось увеличение удельного комбинаторного индекса загрязнения воды на 70% с (3,69 до 5,24).

Наибольший опыт в данном подходе сосредоточен в смежных областях знаний гидрометеорологии, океанологии и гидрологии, а также исследованиях динамической активности горных склонов южной части Большого Кавказа [Чотчаев и др., 2021]. Большая часть исследований сопряжена с использованием зарубежных программных продуктов *ArcGIS* [Матишов и др., 2018]; данных глобального реанализа *ERA Interim*, *NCEP/NCAR* [Лопатухин, Яицкая, 2019]; гидрологических моделей *HEC-RAS*, *HEC-HMS*, *SWAT* имеющих отечественные аналоги – *ECOMAG*, *Flood*, *STREAM\_2D* [Moreido et al., 2021]. В то же время вопросы применения конкретного метода обработки трехмерных данных остаются наиболее сложными. Таким образом, выявление наиболее перспективных методов формирования моделей нелинейных гидрометеорологических и аэрогазовых процессов, является *фундаментальной научной задачей* для обеспечения устойчивого развития территорий за счет повышения качества геоэкологического мониторинга источников загрязнения природной среды. **Цель работы** заключается в выявлении перспективных направ-

лений аппроксимации пространственных геоэкологических данных для обеспечения устойчивого развития территорий.

Для ее достижения необходимо решение следующих задач: выявить наиболее релевантные критерии соответствия моделей («*goodness-of-fit*») экспериментальным данным; проанализировать подходы к выявлению взаимосвязей зависимой переменной от нескольких предикторов при наличии ограничений в данных временных рядов.

### Методы исследования

Для решения поставленных задач применялся комплексный метод исследования, заключающийся в сравнительном анализе методов пространственной интерполяции, машинного обучения и фильтров, основанных на Гауссовских процессах; обобщения теоретико-методологических подходов к оценке получаемых зависимостей на соответствие экспериментальным данным; использовании методов локально оцененного сглаживания рассеянных данных (фильтр Ставицкого-Голея) в сочетании с методом конечных элементов для повышения точности полученных моделей.

### Результаты работы и их обсуждение

*Критерии «goodness-of-fit» для проверки достоверности моделирования.* Используемые модели гидрологических и климатических процессов основаны на проверке их соответствия эмпирическим данным с учетом имеющихся ограничений. Для оценки меры согласия между моделью и опытными данными или результатами моделирования и моделью, чаще всего используют показатели тесноты корреляционной связи, используемые в регрессионном анализе. В зарубежной литературе такие критерии соответствия модели экспериментальным данным называют «*goodness-of-fit*» [Legates, McCabe, 1999]. Часто к ним относятся параметры, описывающие абсолютные (*MAE*, *MSE*, *RMSE*) [Ali et al., 2021] или относительные ошибки (*MAPE*,  $R^2$ ) результатов моделирования, индексы эффективности (*E*, *KGE*) или соответствия (*d*, *AI*, *Wi*) [Montano et al., 2020].

Наибольшее распространение получили следующие меры оценивания. Средняя абсолютная ошибка (*MAE*) – среднеарифметическое всех абсолютных значений ошибок аппроксимации (или прогноза, если речь идет об анализе временных рядов):

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i|, \quad (1)$$

где  $N$  – количество фактических данных наблюдений;

$P$  – значение полученное в результате моделирования;

$O$  – наблюдаемое значение.

Альтернативным критерием точности или качества модели служит среднеквадратическая ошибка (*MSE*) и стандартная ошибка ( $RMSE = \sqrt{MSE}$ ):

$$MSE = N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2, \quad (2)$$

Некоторые исследователи [Ali et al., 2021] в качестве критерия используют коэффициент корреляции Карла Пирсона ( $r$ ) или его значение, возведенное в квадрат ( $r^2$  – частный случай коэффициента детерминации) – нормализованное измерение ковариации или в меру силы линейной связи между двумя переменными:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}}, \quad (3)$$

где  $O$  и  $P$  – средние значения результатов опытных наблюдений и модели.

Более представительно, в качестве критерия соответствия модели использовать коэффициент детерминации ( $R^2$ ) [Chicco et al., 2021] – доля дисперсии прогнозной переменной, которая может быть объяснена на основе опытных данных. Начиная с работы [Legates, McCabe, 1999] вопросы выбора и обоснования наилучшего показателя качества-соответствия при проверке гидроклиматических моделей остаются открытыми. В современных работах осуществляются попытки использования индексных критериев, на основании обобщения как абсолютных, так и относительных показателей (например «индекс адекватности»  $AI$ ). При их использовании авторы не предоставляют результатов «анализа остатков», как это принято для проверки регрессионных моделей. Кроме того, данного рода «обобщенные» критерии не имеют математического обоснования, вводя в заблуждение простотой использования. В упрощенном виде достаточно сравнивать модели по показателям  $RMSE$  и  $R^2$ . Альтернативный метод – использование Квантиль-квантильных ( $Q-Q$ ) графиков для одного или нескольких сечений исследуемой функции. В тоже время одновременное использование не менее двух (не взаимоисключающих) из вышеперечисленных критериев правомерно при относительном сравнении нескольких методов моделирования. Один из выбранных показателей должен указывать на относительные, а другой на абсолютные ошибки.

*Подходы к прогнозированию многофакторных геоэкологических процессов с использованием геопространственного анализа.* Основная задача геостатистики – определение пространственного распределения исследуемой переменной. То есть по ограниченному количеству замеров концентрации метана, проведенных в некоторых точках пространства, требуется определить его значения в любых других пространственных точках – задача интерполяции. В сущности, задачу можно свести к оценке функции максимально приближенной (аппроксимация) к набору опытных точек – экспериментально определенной функции исследуемого процесса заданной в неявном виде. При этом открывается возможность сравнения нескольких параметров (например, среднемесячной температуры воздуха) для одних и тех же географических точек (геопространственный анализ) для определения взаимосвязи интенсивности метановыделения и локальных изменений климата. Наличие фактора времени, а также других объективных предикторов обуславливают усложнение рассматриваемых задач в области дополнительного анализа временных рядов данных. Основные подходы к обработке пространственных данных можно свести к трем типам: детерминированные, стохастические и использующие искусственный интеллект (машинное обучение).

К детерминированным относят методы интерполяции, предполагающие существование аналитической зависимости между данными в заданном пространстве. Основные из них реализуются на основе: взвешивания по обратному расстоянию (Шепарда) ( $IDW$ ), наложения на основе прямоугольников ( $RBB$ ), наложения на основе треугольников ( $TBB$ ), глобальной полиномиальной интерполяции ( $GPI$ ), локальной полиномиальной интерполяции ( $LPI$ ), узловых базисных функций ( $NBF$ ), радиальных базисных функций ( $RBF$ ), конечных элементов ( $FE$ ).

К стохастическим относятся методы, основанные на статистической интерпретации данных, когда пространственная модель является вероятностной функцией. К ним относят: модели пространственной регрессии, простой кригинг (*SK*) или регрессия Гауссовского процесса, обычный кригинг (*OK*), универсальный кригинг (*UK*), эмпирический байесовский кригинг (*EBK*), прогнозирование эмпирической байесовской кригинг-регрессии (*EBKRP*).

Модели искусственного интеллекта основываются на эволюционной оптимизации функций при помощи машинного обучения (*ML*) на основе имеющихся опытных данных: алгоритм *k*-ближайших соседей (*kNN*), лес случайных решений (*RF*), искусственные нейронные сети (*ArtificialNN*), байесовские сети (*BNN*), рекуррентные нейронные сети (*LSTM*, *GRU*) и др.

Диагностика результирующих значений, или обоснование правильности выбора метода, типа модели, а также оптимальность ее параметров является наиболее сложным и трудозатратным процессом. В сущности, вопрос сводится к тому, насколько численные результаты модели (обуславливающие стохастическую взаимосвязь между данными в пространстве) соответствуют опытным данным. Оптимальность методики оценки качества геоэкологических моделей остается дискуссионным вопросом, тем не менее, общие подходы можно сформулировать на основе примеров из смежных областей знаний.

*Применение методов трехмерной интерполяции в области гидродинамики (океанология).* Например, оценку качества прогнозирования моделей динамики береговой линии производят следующим образом [Montano et al., 2020]. Для предсказания изменения береговой линии пляжа Таируа (Новая Зеландия) с 2014 по 2017 гг. на основе фактических данных камер проводился конкурс по моделированию. В конкурсе участвовали два типа моделей: 1) девять гибридных (*Hybridmodel «HM1-9»*) в виде комбинации физических моделей с детерминированными, 2) семь моделей искусственного интеллекта (*Machinelearning – kNN, RF, BNN, Artificial NN «NeuFor»*, рекуррентная нейронная сеть с долговременной и кратковременной памятью «*LSTM*», нелинейная авторегрессионная экзогенная модель «*ANN-EI1*» и «*ANN-EI2*»). Из анализа полученных результатов следует, недостатки гибридных моделей заключаются в невозможности предсказывать относительно быстрые флуктуации исследуемого показателя. Модели машинного обучения хорошо отражают экстремальные локальные отклонения или краткосрочные колебания. В тоже время они генерируют и большие абсолютные ошибки, поскольку значение береговой линии очень зависит от качества предоставленного набора данных для обучения. Это в свою очередь указывает на невозможность учитывать тенденции долгосрочных циклов, находящиеся в «слепой» зоне из-за предоставления краткосрочных данных. Кроме того, использование *Q-Q* графиков позволяет улучшить качество моделирования при перекрестной проверке. Таким образом, прогностическая способность моделей машинного обучения остается низкой. Данный факт подтверждается и относительно низкими показателями  $R^2$  для *ML* моделей, в периоде прогноза (от 0,5 до 0,7), при высоких значениях *RMSE* в диапазоне от 4 до 6 м. Это доказывает, что отделение долгосрочных циклов, а также стохастических флуктуаций и их выделение из обобщенной линии тренда остается сложной задачей.

*Опыт использования интерполяции в метеорологии.* При проведении анализа пространственно-временной изменчивости климатологических данных [Lai, Dzombak, 2019; Das et al., 2017] в основном используют ГИС-приложения. Пример

сравнительной оценки большинства методов с использованием *ArcGIS* представлен при ретроспективном анализе осадков в Пакистане [Ali et al., 2021]. В данной работе детерминированные методы представлены: *IDW*, *RBF*, *LPI*. Стохастические – пятью типами (*OK*, *UK*, *EBK*, *SK*, *EBKRP*) при этом для большинства из них рассматривали семь видов полувариограмм. Анализ значений  $R^2$ , а также проекций поверхностей отклика на карту Пакистана показывает, что модели кригинга не всегда качественно превосходят классические детерминированные методы интерполяции. Кроме того в исследовании не приведено пространственное распределение стандартных ошибок для каждой из моделей, что существенно усложняет интерпретацию полученных результатов. Это вносит дополнительные неопределенности при интерпретации получаемых карт распределения осадков.

*Авторский метод, применительно к вопросам шахтного метана.* Геопространственный анализ в области рудничной аэрогазодинамики производят при помощи регрессионных моделей [Dzhioeva, Tekhov, 2021]. Известно, что для решения задач аппроксимации (когда функция задана в неявном виде) трехмерных функций можно применять интерполяцию, регрессию и сглаживание. К достоинствам детерминированных методов относится способность работать с рассеянными данными, которые неоднородно распределены по сетке без использования декластеризации [Демьянов, Савельева, 2010]. Существенным недостатком является сложность в оценке ошибок, когда интерполянты проходят через экспериментальные точки. В связи с этим классические методы (*IDW* или *FE*) в настоящее время используются все меньше. Преодолеть данный недостаток можно следующим образом. Вначале определяют уравнение регрессии, методом наименьших квадратов используя полиномиальные функции. После чего определяют достоверности моделирования (по выбранным критериям «*goodness-of-fit*» или путем анализа остатков). Затем к этим же данным применяют детерминированный метод интерполяции и снова определяют уравнение регрессии для того же типа модели. Разница в качестве полученной поверхности отклика позволит охарактеризовать эффективность

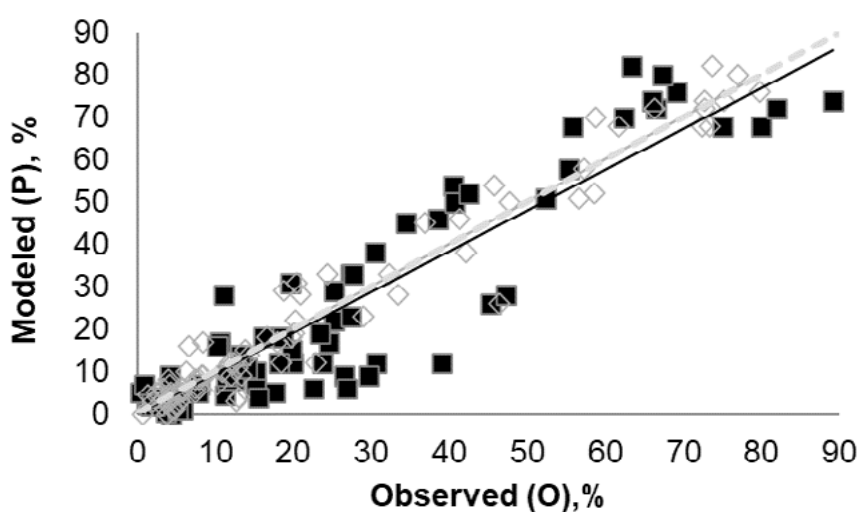


Рис. 1. «Q-Q графики» сигмовидных моделей на основе первичных данных (ромбы) и детерминированных методов интерполяции (квадраты) /

Fig. 1. “Q-Q graphs” of sigmoid models based on primary data (rhombuses) and deterministic interpolation model (squares)

используемого метода. Для проверки вышеописанного подхода использовались данные пространственного распределения метановыделения в подземные скважины из работы [Джиоева, Бригида, 2020]. В отличие от стандартного применения полиномов Чебышева для этого использовали двумерные сигмоидные полиномы 7-го порядка. Кроме того, на первом этапе для сглаживания «выбросов» применили фильтр Ставицкого-Голея [Golik et al., 2020]. На втором этапе к уже сглаженным первичным данным (15 строк по 5-6 точек) применяли метод трехмерной интерполяции конечными элементами по образцу работы [Джиоева, Бригида, 2020], после чего на выходе имелось 1200 точек (15×80). На последнем этапе методом наименьших квадратов определяли оптимальные параметры двумерного сигмовидного полинома регрессионной модели, при которых  $R^2 = 0,906$ . Коэффициент детерминации этой же модели при простом приближении к первичным данным составил  $R^2 = 0,954$ , что существенно отразилось на  $Q-Q$  графике рисунка 1.

Из анализа рисунка 1 следует, что линии тренда для первичных и интерполированных данных достаточно приближены к максимально теоретически достижимой корреляции, (пунктирная линия). Уравнения прямых соответствия моделей сигмовидных функций основанных на экспериментальных ( $P$ ), с  $R^2 = 0,96$  и сглажено-интерполированных данных ( $P'$ ), с  $R^2 = 0,85$  имеют вид:

$$P' = 0.96O + 0.05, \quad (4)$$

$$P = 0.99O + 0.09, \quad (5)$$

Из параметров уравнения (5), а также угла подъема серого линейного тренда (см. рис. 1) очевидно, что сигмовидная модель имеет минимальную степень откло-

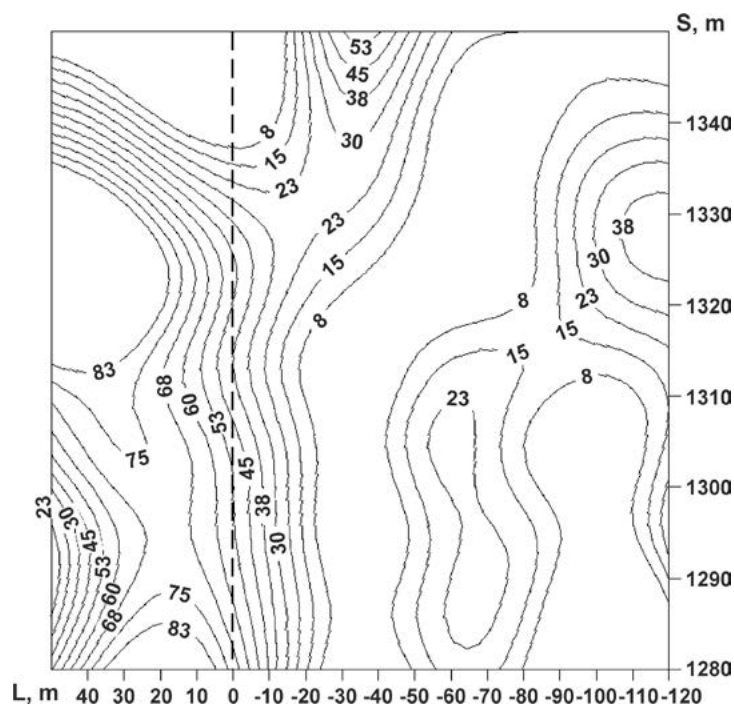


Рис. 2. Пространственное распределение концентрации метана в подземных скважинах в зависимости от протяженности вентиляционной выработки ( $S$ ) и расстояния до линии очистного забоя ( $L$ ) /

Fig. 2. Spatial distribution of methane concentration in underground wells depending on the length of tailgate ( $S$ ) and the distance to the production face ( $L$ )



нения результатов от опытных данных, и более достоверно описывает исследуемый процесс. При последующем анализе проекций поверхности отклика выяснилось, что механическое приближение полиномами генерирует большее искажение модели. Данный эффект аналогичен проблеме большей генерации ошибок при использовании ML моделей эволюции береговой линии пляжа Таурия, который описан выше. Более того, сигмовидная модель (основанная на интерполированных данных) показала максимальное соответствие результатам работы [Джигоева, Бригида, 2020], полученных на основе многочленов Чебышева (рис. 2).

### Выводы

Наличие существенных ограничений в методологии проведения геопро пространственного анализа, при решении трехмерных геоэкологических задач обеспечения устойчивого развития территорий Юга России, обуславливает необходимость совершенствования геоинформационных технологий и их широкого внедрения в горном деле. Из проведенного анализа следует, что для оценки качества моделирования наиболее представительно использовать  $Q-Q$  графики.

Ближние углы наклона линейных трендов таких графиков указывают на достаточную степень приближения полученных результатов к опытным данным (см. рис. 1). В связи с этим сформированный авторский подход к обработке трехмерных данных, позволяет преодолеть основной недостаток детерминированных методов пространственной интерполяции данных (невозможность отображения распределения ошибок моделирования, когда интерполянты проходят через экспериментальные точки). Результаты исследований могут быть использованы при совершенствовании методики пространственного анализа профилей электромагнитного излучения [Iakovleva et al., 2022].

### Литература

1. Голик В. И., Лукьянов В. Г., Хашева З. М. Обоснование возможности и целесообразности использования хвостов обогащения руд для изготовления твердеющих смесей. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. № 5. – С. 6-14.
2. Демьянов В. В., Савельева Е. А. Геостатистика: теория и практика. Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М.: Наука. 2010. – 327 с.
3. Джигоева А. К., Бригида В. С. Пространственная нелинейность динамики метано-выделения в подземных скважинах для устойчивого развития геотехнологий. // Записки Горного института. – 2020. – Т. 245. – С. 522-530. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.3
4. Дребенштетт К., Голик В. И., Дмитрак Ю. В. Перспективы диверсификации технологии добычи металлов в РСО-Алания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2018. – Т. 10. № 1 (35). – С. 125-131. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-1-125-131.
5. Качурин Н. М., Корчагина Т. В., Качурин А. Н., Сидоров Р. В. Оценка газообмена подработанных территорий угольных бассейнов России с атмосферой. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. № 1. – С. 290-302.
6. Когарко Л. Н. Редкоземельный потенциал апатита в месторождениях и отходах производства апатито-нефелиновых руд Хибинского массива. // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2019. № 16. – С. 271-275. DOI: 10.31241/FNS.2019.16.055.
7. Ключев Р. В., Босиков И. И., Майер А. В., Гаврина О. А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – № 2. – С. 283-290.

8. Комащенко В. И., Голик В. И., Белин В. А., Гапоненко А. Л. Повышение эффективности взрывной отбойки на основе новых способов инициирования скважинных зарядов на карьерах. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 9. – С. 293-304.

9. Лопатухин Л. И., Яицкая Н. А. Данные реанализа полей ветра над Каспийским морем для расчета режима ветрового волнения. // Водные ресурсы. – 2019. – Т. 46. № 6. – С. 598-604. DOI 10.31857/S0321-0596466598-604.

10. Матишов Г. Д., Яицкая Н. А., Бердников С. В. Изменение температуры и солёности вод каспийского моря в XX веке. // Океанология. – 2018. – Т. 58. № 6. – С. 864-874. DOI: 10.1134/S0030157418060114.

11. Рыльникова М. В., Владимиров Д. Я., Пыталев И. А., Попова Т. М. Роботизированные геотехнологии как путь повышения эффективности и экологизации освоения недр. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 92-101.

12. Усиков В. И., Липина Л. Н., Александров А. В., Корнеева С. И. Оценка влияния отходов горного производства на окружающую среду с применением ГИС технологий. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 12. – С. 114-126. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-114-126.

13. Хайрутдинов М. М., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Тюляева Ю. С., Хайрутдинов А. М. Бесцементные закладочные смеси на основе водорастворимых техногенных отходов. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 30-36. DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2883.

14. Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10 (4). – С. 70-100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.

15. Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11 (1). – С. 81-94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007.

16. Ali G., Sajjad M., Kanwal S., Xiao T, Khalib Sh, Shoaib F., Gul H. N. Spatial-temporal characterization of rainfall in Pakistan during the past half-century (1961–2020). // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. No. 1. Article No 6935. DOI: 10.1038/s41598-021-86412-x.

17. Chicco D., Warrens M. J., Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. // Peer J. Computer Science. – 2021. – Article No 7: e623. DOI: 10.7717/peerj-cs. 623.

18. Das M., Hazra A., Sarkar A., Bhattacharya S., Banik P. J. M. Comparison of spatial interpolation methods for estimation of weekly rainfall in West Bengal, India. // Mausam. – 2017. – Vol. 68. No 1. – pp. 41-50.

19. Dzhioeva A. K., Tekhov A. V. Reduction of mine methane emissions for ensuring sustainable development of geotechnologies in the transition to Industry 3.0. // Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1064. Article No 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012008.

20. Golik V. I., DmitrakYu. V., Brigida V. S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2020. – Vol. 5. – pp. 47-54. DOI: <https://doi.org/10.33271/NVNGU/2020-5/047>.

21. Lai Y., Dzombak D. A. Use of historical data to assess regional climate change. // Journal of Climate. – 2019. – Vol. 32. No. 14. – pp. 4299-4320. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0630.1.

22. Legates D. R., McCabe Jr., G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. // Water Resources Research. – 1999. – Vol. 35. No. 1. – pp. 233-241. DOI: 10.1029/1998WR900018.

23. Montano J., Coco G., Antolinez J. A. A., Beuzen T., Bryan K. R., Cagigal L., Castelle B., Davidson M. A., Goldstein E. B., Ibaceta R., Idier D., Ludka B. C., Masoud-Ansari S., Méndez F. J.,

Murray A. B., Plant N. G., Ratliff K. M., Robinet A., Rueda A., Sénéchal N., Simmons J. A., Splinter K. D., Stephens S., Townend I., Vitousek S., Vos K. Blind testing of shoreline evolution models. // *Scientific Reports*. – 2020. No. 10. Article No 2137. DOI: 10.1038/s41598-020-59018-y.

24. Moreido V., Gartsman B., Solomatine D. P., Suchilina Z. How well can machine learning models perform without hydrologists? Application of rational feature selection to improve hydrological forecasting. // *Water (Switzerland)*. – 2021. – Vol. 13. No. 12. Article No 1696. DOI: 10.3390/w13121696.

25. Saunio M., Jackson R. B., Bousquet P., Poulter B., Canadell J. G. The growing role of methane in anthropogenic climate change. // *Environmental Research Letters*. – 2016. – Vol. 11. No. 120207. DOI: 10.1088/1748-9326/11/12/120207.

26. Zaalishvili V. B., Kanukov A. S., Fidarova M. I. GIS-technologies in geophysical information databases processing. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 913. – 2020b. – pp. 052050. DOI: 10.1088/1757-899X/913/5/052050.

27. Iakovleva E., Belova M., Soares A., Rassõlkin A. On the Issues of Spatial Modeling of Non-Standard Profiles by the Example of Electromagnetic Emission Measurement Data. // *Sustainability (Switzerland)*. – 2022. – Vol. 14 (1). – Article No 574. DOI: 10.3390/su14010574.

## References

1. Golik V. I., Lukyanov V. G., Khasheva Z. M. Substantiation of the possibility and expediency of using ore dressing tailings for the manufacture of hardening mixtures. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. 2015. Vol. 326. No. 5. pp. 6-14. (In Russ.)

2. Demyanov V. V., Savelyeva E. A. *Geostatistics: theory and practice*. Institute for Problems of Safe Development of Nuclear Power Engineering, Russian Academy of Sciences. Moscow. Nauka. 2010. 327 p. (In Russ.)

3. Dzhioeva A. K., Brigida V. S. Spatial Nonlinearity of Methane Release Dynamics in Underground Wells for the Sustainable Development of Geotechnologies. *Notes of the Mining Institute*. 2020. Vol. 245. pp. 522-530. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2020.5.3

4. Drebenshtedt K., Golik V. I., Dmitrak Yu. V. The prospects of diversification of technology of extraction of metals in republic of North Osetia-Alaniya. *Sustainable development of mountain territories*. 2018. Vol. 10. No. 1. Issue 35. pp. 125-131. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-1-125-131.

5. Kachurin N. M., Korchagina T. V., Kachurin A. N., Sidorov R. V. Estimation of gas exchange of undermined territories of Russian coal basins with the atmosphere. In: *Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2021. No. 1. pp. 290-302. (In Russ.)

6. Kogarko L. N. Rare-earth potential of apatite in deposits and production wastes of apatite-nepheline ores of the Khibiny massif. In: *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS*. 2019. No. 16. pp. 271-275. (In Russ.) DOI: 10.31241/FNS.2019.16.055.

7. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Maier A. V., Gavrina O. A. Comprehensive analysis of the use of effective technologies to improve the sustainable development of the natural and technical system. *Sustainable development of mountain territories*. 2020. No. 2. pp. 283-290. (In Russ.)

8. Komashchenko V. I., Golik V. I., Belin V. A., Gaponenko A. L. Improving the efficiency of explosive breaking based on new methods of initiating borehole charges in quarries. *Mining information and analytical bulletin*. 2014. No. 9. pp. 293-304. (In Russ.)

9. Lopatukhin L. I., Yaitskaya N. A. Reanalysis data of wind fields over the Caspian Sea to calculate the wind wave regime. *Water resources*. 2019. Vol. 46. No. 6. pp. 598-604. (In Russ.) DOI 10.31857/S0321-0596466598-604.

10. Matishov G. D., Yaitskaya N. A., Berdnikov S. V. Changes in the temperature and salinity of the waters of the Caspian Sea in the 20th century. *Oceanology*. 2018. Vol. 58. No. 6. pp. 864-874. (In Russ.) DOI: 10.1134/S0030157418060114.

11. Rylnikova M. V., Vladimirov D. Ya., Pytalev I. A., Popova T. M. Robotic geotechnologies as a way to improve the efficiency and ecologization of subsoil development. *Physical and technical problems of mineral development*. 2017. No. 1. pp. 92-101. (In Russ.)

12. Usikov V.I., Lipina L.N., Alexandrov A.V., Korneeva S.I. Assessment of the impact of mining waste on the environment using GIS technologies. Mining information and analytical bulletin. 2019. No. 12. pp. 114-126. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-114-126.
13. Khairutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyaeva Yu.S., Khairutdinov A.M. Cementless stowing mixtures based on water-soluble man-made waste. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources. 2020. Vol. 331. No. 11. pp. 30-36. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2883.
14. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high mountain areas. Geology and geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 70-100. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.
15. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high mountainous areas by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. Geology and geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 81-94. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007.
16. Ali G., Sajjad M., Kanwal S., Xiao T, Khalib Sh, Shoaib F., Gul H.N. Spatial-temporal characterization of rainfall in Pakistan during the past half-century (1961–2020). Scientific Reports. 2021. Vol. 11. No. 1. Article No 6935. DOI: 10.1038/s41598-021-86412-x.
17. Chicco D., Warrens M.J., Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. Peer J. Computer Science. 2021. Article No. 7: e623. DOI: 10.7717/peerj-cs. 623.
18. Das M., Hazra A., Sarkar A., Bhattacharya S., Banik P.J. M. Comparison of spatial interpolation methods for estimation of weekly rainfall in West Bengal, India. Mausam. 2017. Vol. 68. No 1. pp. 41-50.
19. Dzhioeva A.K., Tekhov A.V. Reduction of mine methane emissions for ensuring sustainable development of geotechnologies in the transition to Industry 3.0. Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1064. Article No 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012008.
20. Golik V.I., DmitrakYu. V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020. Vol. 5. pp. 47-54. DOI: <https://doi.org/10.33271/NVNGU/2020-5/047>.
21. Lai Y., Dzombak D.A. Use of historical data to assess regional climate change. Journal of Climate. 2019. Vol. 32. No. 14. pp. 4299-4320. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0630.1.
22. Legates D.R., McCabe Jr., G.J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research. 1999. Vol. 35. No. 1. pp. 233-241. DOI: 10.1029/1998WR900018.
23. Montano J., Coco G., Antolinez J.A. A., et al. Blind testing of shoreline evolution models. Scientific Reports. 2020. No. 10. Article No. 2137. DOI: 10.1038/s41598-020-59018-y.
24. Moreido V., Gartsman B., Solomatine D.P., Suchilina Z. How well can machine learning models perform without hydrologists? Application of rational feature selection to improve hydrological forecasting. Water (Switzerland). 2021. Vol. 13. No. 12. Article No 1696. DOI: 10.3390/w13121696.
25. Saunio M., Jackson R.B., Bousquet P., Poulter B., Canadell J.G. The growing role of methane in anthropogenic climate change. Environmental Research Letters. 2016. Vol. 11. No. 120207. DOI: 10.1088/1748-9326/11/12/120207.
26. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Fidarova M.I. GIS-technologies in geophysical information databases processing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 913. 2020b. pp. 052050. DOI: 10.1088/1757-899X/913/5/052050.
27. Iakovleva E., Belova M., Soares A., Rassõlkin A. On the Issues of Spatial Modeling of Non-Standard Profiles by the Example of Electromagnetic Emission Measurement Data. Sustainability (Switzerland). 2022. Vol. 14. No. 1. Article No 574. DOI: 10.3390/su14010574.