

DOI:10.47370/978-5-91692-926-3-2021-66-73

*Бригида В.С., ФГБОУН «ФИЦ «СНЦ РАН»», г. Сочи*

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ТРЕХМЕРНОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

***Аннотация.** Повышение качества геоэкологического мониторинга источников загрязнения окружающей природной среды в результате антропогенного воздействия на биосферу остается сложной междисциплинарной проблемой. Нелинейность исследуемых процессов обуславливает необходимость решения многомерных геоэкологических задач, что требует усложнения инструментов геопространственного анализа. В связи с этим возрастает необходимость совершенствования методики интерполяции климатических и гидрометеорологических данных. Сущность методики исследования состояла в классификации и анализе детерминированных, машинного обучения и стохастических методов аппроксимации функций, заданных в неявном виде. Предложенный. В результате было выявлены основные недостатки большинства типов методов, а также предложено использовать алгоритм Loess в сочетании с методом конечных элементов для повышения точности полученных моделей при формировании нового подхода к интерполяции гидрометеорологических данных. Использование результатов работы в смежных областях знаний позволяет выявлять оптимальные параметры детерминированных методов пространственной интерполяции для конкретных типов задач.*

***Ключевые слова:** геоэкология, трехмерные задачи гидрометеорологии, геопространственный анализ, экологический мониторинг.*

### **Введение.**

В прибрежных районах Черноморского побережья Кавказа сосредоточена большая часть экосистемных услуг субтропической зоны России. Этим определяется важность сохранения туристских ресурсов для раскрытия большого потенциала туризма, в качестве

внутреннего источника экономического роста. Сама туриндустрия, является очень чувствительной к внешним шокам (изменение климата, экологические кризисы, опасные гидрометеорологические последствия) и введению внутренних ограничений. Проблема оценки развития природных опасностей активизированных антропогенной деятельностью заключается во взаимном учете двух и более явлений (трехмерные математические модели), обуславливающих наличие синергетических эффектов.

Непрерывный рост внутренних и внешних туристских потоков наносит существенный ущерб ресурсам туристских дестинаций. В тоже время важность оценки степени деградации окружающей природной среды при оценке экологического фактора, а также необходимость экологизации структурных элементов турпродуктов доказана во многих исследованиях [Мишулина, Молчанова, 2021; Brigida et al., 2020].

Нарушение естественных ландшафтов, снижение видового богатства и проявление эффекта компенсации плотностью в антропогенных растительных сообществах на материковых территориях Западного Кавказа может привести к снижению объемов экосистемных услуг в туристских дестинациях [Акатов и др., 2016; 2019]. В результате этого актуализируется целый комплекс проблем: интенсификация глобальных процессов изменения климата с ростом эмиссии парниковых газов на региональном уровне, загрязнение рек и водоносных горизонтов стоками; изменение гидрологического режимам рек в области влияния действующих туристических предприятий. Отдельного внимания заслуживают вопросы оценки изменения гидрографической сети, геоморфологии русел рек и водотоков, а также мониторинга пространственно-временных изменений содержания загрязняющих веществ в речных наносах.

#### **Подходы к трехмерной интерполяции гидрометеорологических данных.**

В большинстве вышеописанных вопросов сложность и нелинейность протекания исследуемых процессов обуславливает необходимость решения многомерных геоэкологических задач [Golik et al., 2020; Курыгина, 2020]. Их можно свести к некоторым комбинациям трехмерных, при этом основные типы методов обработки трехмерных гидрометеорологических данных приведено в таблице 1.

### Основные направления в пространственной интерполяции данных

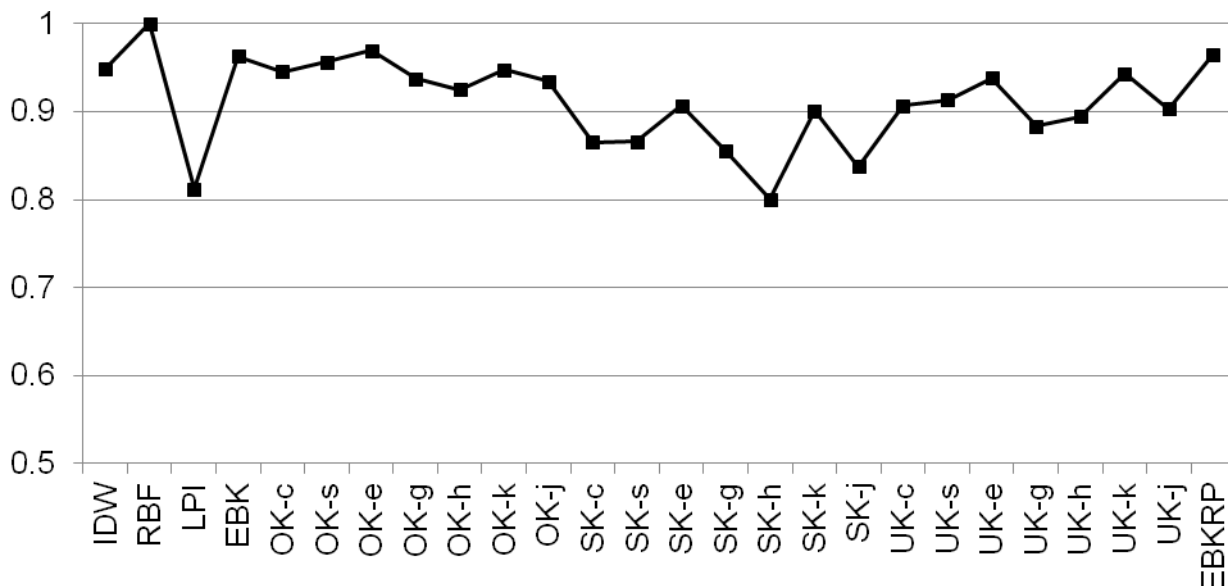
Детерминированные				
На основе: взвешивания по обратному расстоянию (Шепарда)	Глобальной полиномиальной интерполяции	Локальной полиномиальной интерполяции	Радиальных базисных функций	Конечных элементов (R. Renka)
Стохастические				
Обычный кригинг (OK)	Простой кригинг (SK)	Универсальный кригинг (UK)	Эмпирический байесовский кригинг (EBK)	Прогнозирование эмпирической байесовской кригинг-регрессии (EBKRP)
на основе семи видов полувариограмм:				
круговой «-с»			-	-
сферической (-s)				
экспоненциальной (-e)				
Гауссовской (-g)				
эффектом отверстия (-h)				
К-Бесселя (-k)				
Методы машинного обучения (Machine learning)				
алгоритм k-ближайших соседей	лес случайных решений	искусственные нейронные сети	байесовские сети	рекуррентные нейронные сети

При проведении анализа пространственно-временной изменчивости климатологических данных [Матишов и др., 2018; Skrynyk et al.; 2020] в основном используют ГИС-приложения [Чотчаев и др., 2021], в которых имеется возможность выбора из детерминированных и стохастических моделей интерполяции. Наиболее широко распространенной среди иностранных специалистов является программа *ArcGIS* от *ESRI*. Ее применение позволяет сравнивать наиболее применяемые детерминированные и стохастические модели.

Пример сравнительной оценки большинства методов с использованием *ArcGIS* представлен при ретроспективном анализе осадков в Пакистане [10]. В данной работе детерминированные методы представлены: *IDW*, *RBF*, *LPI*. Стохастические методы были представлены пятью типами (*OK*, *UK*, *EBK*, *SK*, *EBKRP*) при этом для большинства из них рассматривали семь видов полувариограмм («-с», «-s», «-e», «-g», «-h», «-k» и Дж-Бессель «-j»).

Результаты критерия качества-соответствия для данных вариантов показаны на рисунке 1.

Анализ значений  $R^2$  представленных на рисунке 1, 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. Сам подход, подразумевающий индексное взвешивание критериев качества соответствия на основе «их вклада в пригодность определенного метода интерполяции» [Ali et al., 2021] не вызывает доверия из-за ухода от математической интерпретации каждого из них. При этом даже наиболее «эффективные» по выбранным параметрам модели могут иметь достаточно низкую прогностическую способность в виду наличия фактора неопределенности (стохастических флуктуаций функции отклика).

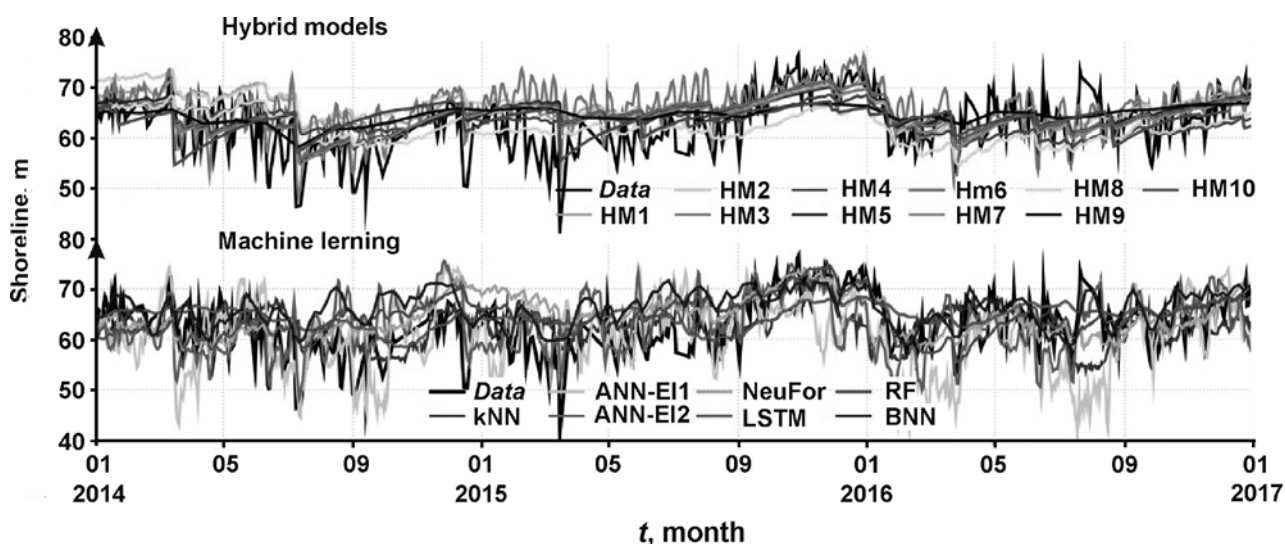


**Рис. 1.** Изменение величины коэффициента детерминации моделей пространственной интерполяции осадков в Пакистане

В случае наличия рассеянных данных, например значений эмиссии шахтного метана, выявление их пространственного распределения (перевод к сеточным данным в привязке к параметрам координат) при помощи алгоритма применения Loess позволяет использовать междисциплинарный подход для решения задач в любой области знаний [Бригида др., 2019]. Кроме того, обработанные таким образом данные (после «сглаживания») могут применяться в качестве узлов решетки для использования метода R. Renka [Джиоева, Бригида, 2020]. Подобными по своей сложности, вопросы оценки динамики метановыделения, является проблема оценки се-

зонных флуктуаций волнового климата [Лопатухин, Яицкая, 2019]. Выявление особенностей характера и режимов волнения ограничено объемами и качеством имеющейся сети мониторинга, большой протяженностью прибрежной акваторий и необходимостью в обработке протяженного ряда значений при реанализе [Яицкая и др., 2021].

Использование моделирования ветровых волн широко используется для прогнозирования динамики береговой линии, при этом качество таких прогнозов остается низким [Montano et al., 2020]. В данном исследовании приведен, на наш взгляд, наиболее представительный пример оценки динамики береговой линии (конкурс "Shoreshop") линии пляжа Таируа (Новая Зеландия). Прогноз был необходим за период 2014-2017 гг. для этого использовали гибридные модели и модели машинного обучения (Рис. 2).

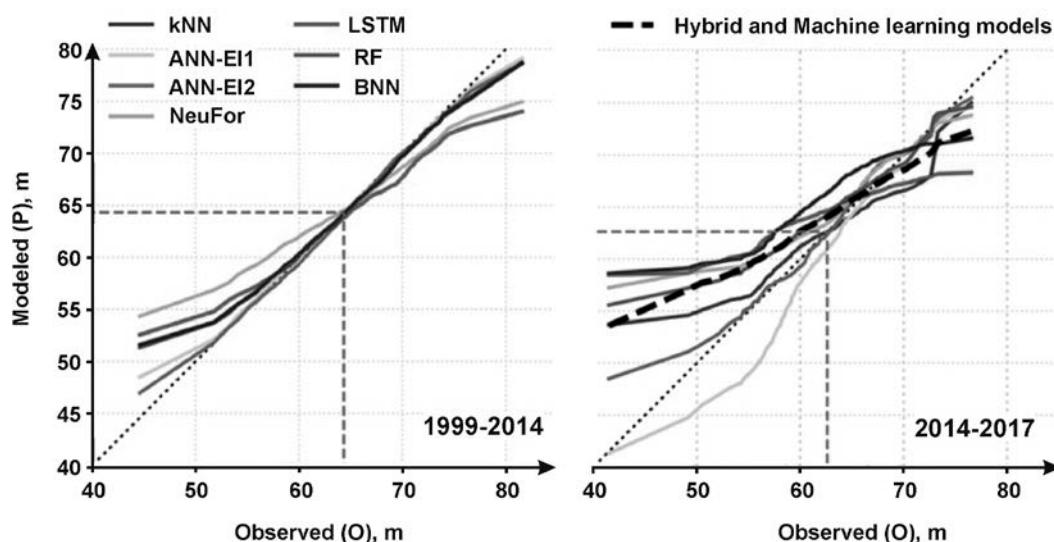


**Рис. 2.** Динамика береговой линии пляжа Таируа (Shoreline) от времени ( $t$ ) [15]: HM1-9 – результаты прогноза гибридными моделями; kNN, RF, BNN, NeuFor, LSTM, ANN-EI1,2 – результаты прогноза моделями искусственного интеллекта; Data – экспериментальные кривые

Из анализа графиков рисунка 1 следует, что большинство моделей достаточно хорошо предсказывали особенности сезонных изменений береговой линии. Недостатки гибридных моделей заключаются в невозможности предсказывать относительно быстрые флуктуации или экстремально высокие отклонения с относительно малым периодом реализации исследуемого показателя. Модели «machine learning» хорошо отражают экстремальные локальные отклонения или краткосрочные колебания. В тоже время они генерируют и большие абсолютные ошибки, поскольку значение берего-

вой 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.

Из анализа использования различных инструментов для проверки адекватности моделей следует, что наиболее достоверным индикатором соответствия является графический анализ остатков (стандартных ошибок) и пространственного распределения их максимальных значений. При этом переход к использованию  $Q-Q$  графиков (когда по оси абсцисс откладывают измеренное значение в точке, а по оси ординат – модельные результаты для этой же точки) позволяет оценить качество моделей по их отклонению от теоретически достижимой линии максимальной корреляции теоретических и опытных данных. Пример построения таких графиков для условий пляжа Таируа представлен на рисунке 3.



**Рис. 3.** «Q-Q графики» моделей машинного обучения в период калибровки (1999-2014) и период прогноза для наблюдаемых (O) и расчетных (P) значений [15]

Таким образом, прогностическая способность моделей машинного обучения в период калибровки существенно выше, чем в прогностном периоде перекрестной проверки. 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.

**Выводы.** В современных условиях наличия огромного количества баз данных о пространственном распределении поллютантов

почвы, приземных слоев воздуха и гидросферы обуславливает необходимость повышения эффективности ее анализа, для качественной интерпретации и прогноза техногеннонарушенных гидрометеорологических и аэрогазовых процессов. К основному недостатку детерминированных методов стоит отнести невозможность отображения пространственного распределения ошибок, когда интерполянты проходят через экспериментальные точки. В тоже время в различных областях знаний накопился весьма значительный опыт их применения (в некоторых они стали «классическими» для решения некоторых задач). Широкое использование в настоящее время стохастических методов интерполяции (реализованных в большинстве ГИС приложений) не всегда приводит к получению более достоверных моделей, чем например при использовании детерминированных методов. Отделение долгосрочных циклов, а также фильтрация стохастических флуктуаций и их выделение из обобщенной линии тренда остается сложной задачей для методов, основанных на машинном обучении.

В связи с этим дальнейшие исследования необходимо сосредоточить в области формирования нового подхода к интерполяции гидрометеорологических данных, позволяющего комплексно использовать преимущества детерминированных и стохастических методов интерполяции, при повышении качества трехмерных моделей.

#### Литература:

Акатов В.В., Акатова Т.В., Афанасьев Д.Ф., Сазонец Н.М., Сушкова Е.Г., Чефранов С.Г. Природа связи между степенью доминирования и видовым богатством в растительных сообществах разных типов: биологические или случайные процессы? // Экология. 2019. № 5. С. 332-340. DOI: 10.1134/S0367059719040036

Акатов В.В., Акатова Т.В., Ескина Т.Г., Загурная Ю.С., Сазонец Н.М., Чефранов С.Г. Эффект компенсации плотностью в маловидовых растительных сообществах материковых территорий (на примере Западного Кавказа) // Журнал общей биологии. 2016. Т. 77. № 1. С. 38-53.

Бригида В.С., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З., Голик В.И. Использование разгрузочного бурения для обеспечения безопасности отработки газоносных угольных пластов Донбасса // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 3. С. 7-11. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-3-7-11.

Джигоева А.К., Бригида В.С. Пространственная нелинейность динамики метановыделения в подземных скважинах для устойчивого развития геотехнологий // Записки Горного института. 2020. Т. 245. С. 522-530. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.3.

Курыгина Н.А. Экологический туризм как важный инструмент сохранения водных и земельных ресурсов // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2020. Т. 14. № 4. С. 90-96. DOI: 10.31161/1995-0675-2020-14-4-90-96.

Лопатухин Л.И., Яицкая Н.А. Волновой климат Каспийского моря. Входные данные по ветру для гидродинамического моделирования и некоторые результаты расчетов // Океанология. 2019. Т. 59. № 1. С. 12-21. DOI 10.31857/S0030-157459112-21.

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

Мишулина С.И., Молчанова В.А. Цели «Зеленых» кластеров в туризме // Вестник Волгоградского государственного университета. Экономика. 2021. Т. 23. № 3. С. 51-62. DOI: 10.15688/ek.jvolsu.2021.3.5

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. 11 (1). 81-94. DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007.

Яицкая Н.А., Шевердяев И.В., Магаева А.А., Бригида В.С. Реконструкция опасных нагонов в Северном Каспии на основе цифровой модели рельефа дна и гидрологического моделирования // Наука Юга России. 2021. Т. 17. № 3. С. 18-29. DOI: 10.7868/S25000640210303.

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

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. Т. 12. № 1 (43). С. 18-25. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-18-25.

Golik V.I., Dmitrak Y.V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings // Науковий Вісник Національного Гірничого університету. 2020. Т. 2020. № 5. С. 47-54. DOI: 10.33271/NVNGU/2020-5/047.

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, 2137. DOI: 10.1038/s41598-020-59018-y.

Skrynyk O.A., Osadchyi V.I., Szentimrey T., Bihari Z., Sidenko V.P., Oshurok D.O., Boichuk D.O., Skrynyk O.Y. Spatial interpolation of climatological data with relief and physico-geographical peculiarities of the territory of Ukraine taken into account // Ukrainian Geographical Journal. 2020. Vol. 2. No 110. pp. 13-19. [In Ukr]. DOI:10.15407/ugz2020.02.013.