

УДК 551.577.13:001.891.57
DOI 10.17513/use.38329

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОСАДКОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КРИГИНГА (НА ПРИМЕРЕ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ)

¹Галушин Д.А., ^{1,2}Громов С.А.

¹ФГБУ «Институт глобального климата и экологии им. акад. Ю.А. Израэля»,
Москва, e-mail: galushin2012@yandex.ru

²ФГБУН «Институт географии Российской Академии Наук», Москва,
e-mail: gromov@igras.ru

Целями исследования являются пространственное моделирование и анализ химического состава осадков на основе метода кригинга для территории Иркутской области с помощью геоинформационной системы SAGA. В качестве экспериментальных оценок приводятся результаты пространственного моделирования концентраций загрязняющих веществ в атмосферных осадках (сульфатов и нитратов) на территории Иркутской области. Серии экспериментов с различными функциями интерполяции, использованными при расчетах на основе метода кригинга, позволили проверить качество пространственного моделирования с помощью схемы «перекрестной проверки» на разных временных наборах данных из-за вариаций количества станций мониторинга химического состава осадков в этом регионе за период 2003–2020 годы. Исследование показало, что при оценке первого набора данных интерполяции, который охватывает период с 2003 по 2007 годы и включает концентрации сульфатов в осадках, наиболее подходящей является Гауссова модель. Для периода 2010–2020 годы подходит использование силовой функции и линейной функции («без самородка»). Таким образом, для периода с 2003 по 2020 годы оптимальным решением будет использовать комбинацию Гауссовой и линейной функций без самородка. Эти расчеты подтверждают, что при использовании метода кригинга необходимо тщательно подбирать функцию, основываясь на модельной вариограмме для каждого года наблюдений.

Ключевые слова: геоинформационные системы, химический состав осадков, загрязнение атмосферы, кригинг, Иркутская область,

Исследование выполнено в рамках темы НИОКТР АААА-А20-120013190049-4 «Развитие методов и технологий мониторинга загрязнения природной среды вследствие трансграничного переноса загрязняющих веществ (ЕЭК ООН: ЕМЕП, МСП КМ) и кислотных выпадений в Восточной Азии (ЕАНЕТ)». Оценка данных моделирования сделана в работах по Госзаданию FMWS-2024-0009 №1023032700199-9 Института географии РАН.

SPATIAL MODELING AND ANALYSIS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF PRECIPITATION BASED ON THE KRIGING METHOD (ON THE EXAMPLE OF THE IRKUTSK REGION)

¹Galushin D.A., ^{1,2}Gromov S.A.

¹Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, e-mail: galushin2012@yandex.ru

²Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: gromov@igras.ru

The purpose of the study is spatial modeling and analysis of the chemical composition of precipitation based on the Kriging method for the territory of the Irkutsk region using the SAGA geoinformation system. The results of spatial modeling of concentrations of pollutants in atmospheric precipitation (sulfates and nitrates) in the Irkutsk region are presented as experimental estimates. A series of experiments with various interpolation functions used in calculations based on the Kriging method allowed us to verify the quality of spatial modeling using a «cross-validation» scheme on different time datasets due to variations in the number of stations monitoring the chemical composition of precipitation in this region over the period 2003–2020. The study showed that when evaluating the first set of interpolation data, which covers the period from 2003 to 2007 and includes sulfate concentrations in precipitation, the Gaussian model is the most appropriate. For the period 2010–2020, the use of a power function and a linear function («without a nugget») is suitable. Thus, for the period from 2003 to 2020, the optimal solution would be to use a combination of Gaussian and Linear functions without a nugget. These calculations confirm that when using the Kriging method, it is necessary to carefully select the function based on the model variogram for each year of observations.

Keywords: geoinformation systems, chemical composition of precipitation, atmospheric pollution, Irkutsk region, kriging

The study was carried out within the framework of the R&D topic АААА-А20-120013190049-4 “Development of methods and technologies for monitoring environmental pollution due to transboundary transport of pollutants (UNECE: EMEP, ICP KM) and acid deposition in East Asia (EANET)”. The modeling data was assessed in the works on the State assignment FMWS-2024-0009 No. 1023032700199-9 of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences.

Введение

Геоинформационные системы открыли новые горизонты в научных исследованиях. На ранних этапах развития метеорологии, климатологии и геоэкологии главным источником информации были инструментальные наблюдения, проводимые с помощью аналоговых приборов, таких как термометры, осадкомеры и барометры. Единственным статистическим методом обработки данных было их усреднение за определенные периоды – неделю, декаду или месяц. Однако такой подход не позволял учитывать пространственно-временные изменения параметров [1].

С появлением возможностей совмещения по времени однотипных наблюдений, а позднее – использования моделирования появилась возможность визуализировать распределение данных в пространстве в виде карты. Это значительно упростило анализ как пространственных особенностей процессов, так и динамики изменений.

Методы геостатистики, основанные на математических моделях и учитывающие пространственную автокорреляцию, позволяют не только создать поверхность интерполяции по наборам значений характеристик, но и оценить качество проведенной интерполяции в количественном выражении.

Ключевой моделью в геостатистике является кригинг, названный в честь инженера Д. Крига, который первым применил этот метод для анализа золотых месторождений в Южной Африке. Как продемонстрировал Д. Матерон, кригинг обеспечивает минимизацию суммы квадратов отклонений прогнозируемых значений от фактических значений пространственной переменной [2, с. 270]. Применение этого метода широко распространено в исследованиях воздействия атмосферного загрязнения для получения пространственных результатов оценок, в частности поступления веществ в природные экосистемы и сравнения с критическими нагрузками [3, с. 648].

Существует множество разновидностей кригинга: простой, ординарный, индикаторный, универсальный и др. В практической деятельности обычно применяют простой или ординарный кригинг. Основное различие между ними заключается в том, что при использовании простого кригинга предполагается, что детерминистическая компонента остается постоянной и известной на всей исследуемой территории. В то же время, при ординарном кригинге

неизвестным остается среднее значение. Для локальных задач также выдвигается гипотеза о том, что среднее значение меняется только в непосредственной близости от точки оценки.

В данной работе представлено использование метода кригинга как одного из самых эффективных для моделирования, который позволяет создавать цифровую поверхность с высокой точностью даже в условиях неравномерного расположения сетей мониторинга, таких как наблюдения за химическим составом осадков (ХСО).

Целями исследования являются пространственное моделирование и анализ химического состава осадков на основе метода кригинга для территории Иркутской области с помощью геоинформационной системы SAGA.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1) сбор и систематизация многолетних данных о концентрациях загрязняющих веществ в атмосферных осадках на основе публикаций Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова;

2) изучение алгоритмов работы модуля кригинга в ГИС SAGA;

3) исследование влияния изменений параметров настройки кригинга на результаты интерполяции;

4) выбор оптимальных функций интерполяции данных методом кригинга для каждого года наблюдений.

Материал и методы исследования

В рамках эксперимента по интерполяции данных были использованы сведения о концентрациях загрязняющих веществ в атмосферных осадках на территории Иркутской области за несколько временных периодов: с 2003 по 2007 годы, с 2008 по 2020 годы и с 2010 по 2020 годы.

Такая периодичность обусловлена тем, что модуль в геоинформационной системе не позволяет проводить интерполяции с использованием точек, где были пропущены годы. Сами SDAT-файлы для дальнейшей оценки интерполяции были сформированы по годам.

Таким образом, в начале первого периода в регионе функционировали четыре станции мониторинга ХСО: Хамар-Дабан, Черемхово, Хужир и Саянск (без учета станции Иркутск). В 2008 году начали работать две новые станции – Исток Ангары и Байкальск, а в 2010 году – станция Большое Голоустное [4, с. 31; 5, с. 32].

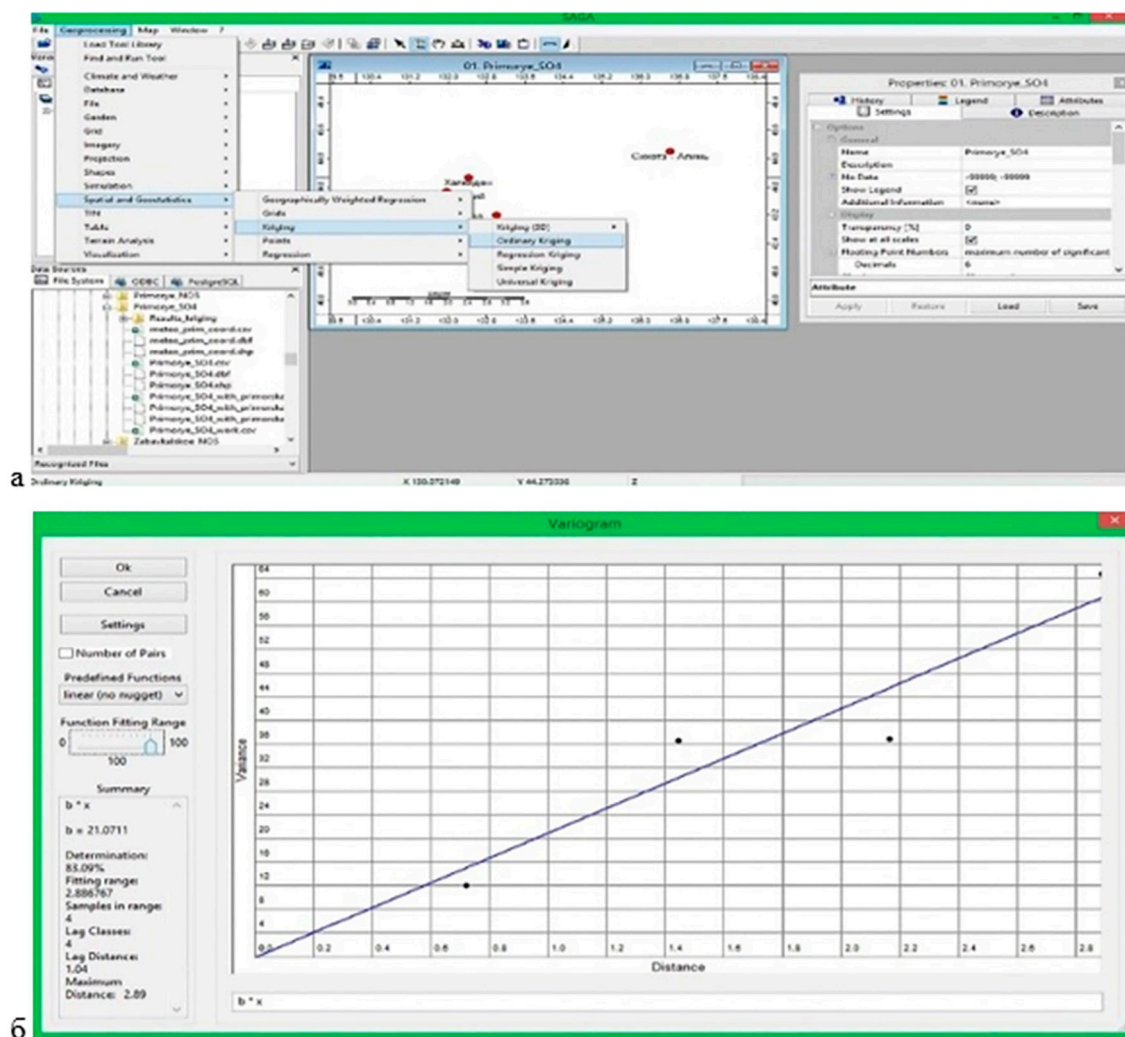


Рис. 1. Расположение модуля ординарного кригинга в ГИС Saga (а) и вариограмма данных (б)

Для проверки точности интерполяции используется метод перекрестной проверки. Он заключается в том, что в процессе интерполяции исключается одна точка с уже известными данными, полученными по наблюдениям на этой станции. Далее проводится интерполяция в этой точке, и интерполированные значения сравниваются с данными, которые были исключены из процесса [6, с. 461].

Выбор программного комплекса SAGA обусловлен его преимуществами: он является дополнительной ГИС к основному комплексу QGIS, имеет открытый исходный код, который можно использовать для развития других ГИС, а также его можно скачивать и использовать безвозмездно, что особенно важно для научных исследований [7, с. 57].

Метод кригинга можно выбрать в программе SAGA через меню Geoprocessing – Spatial and Geostatistica – Kriging – Ordinary Kriging (рис. 1а).

В настройках обычного кригинга необходимо указать слой, из которого будет происходить интерполяция, атрибут, который требуется интерполировать, а также границы эксперимента. В качестве точек для интерполяции используются станции ХСО, данные которых содержат сведения о координатах и концентрациях веществ за каждый год. Из атрибутов выбирается год, который подлежит интерполяции.

Можно ограничить границы эксперимента слоем с точками или указать пользовательские координаты. Для Иркутской области – это полигон с диапазоном границ от 100 до 109,5° в.д. и от 51 до 55° с.ш. Размер одной ячейки интерполированной поверхности составляет 0,001°. При указании необходимых параметров настройки автоматически производится расчет количества столбцов и строк предполагаемой поверхности. После подтверждения задан-

ных параметров на экране появляется вариограмма (рис. 16).

В геоинформационной системе SAGA работа с вариограммой осуществляется через выбор модельной функции (линейная, сферическая, Гаусса и др.) и диапазона ее установки – расстояния до конкретной точки, на которой будет проводиться аппроксимация [8, с. 179].

В качестве выходных данных ГИС предоставляет информацию о формуле, используемой в модели, а также о коэффициенте детерминации. Кроме того, на экран выводятся сведения о диапазоне установки в единицах измерения карты (обычно это единицы выбранной координаты), количестве образцов в этом диапазоне, количестве радиусов влияния (lag classes), расстоянии радиуса влияния и максимальной дистанции (рис. 16).

Авторами было апробировано по 10 различных моделей интерполяционных функций для каждого года наблюдения в период с 2003 по 2020 годы, которые включали в себя линейную, линейную без эффекта самородка (linear non nugget), кубическую, экспоненциальную, Гауссову, логарифмическую, силовую, сферическую, квадратичную и стабильную модели [9, с. 33].

Таким образом, только для концентраций сульфатов в осадках в Иркутской области было получено 180 интерполяционных поверхностей (10 моделей * 18 лет), пример которых представлен на рисунке 2. Если добавить поверхности для нитратов, то общее их количество достигнет 360 (рис. 2).

Чтобы вычислить модельное значение в отсутствующей точке, авторы использовали QGIS для расшифровки SDAT-файлов. Для каждого года и типа модели были составлены таблицы с модельными значениями сульфатов и нитратов. Затем авторы создали итоговую таблицу, в которой сравнили исходные данные для рассматриваемого пункта и значения, полученные в результате интерполяции.

Результаты исследования и их обсуждение

При анализе первого набора данных интерполяции, который охватывает период с 2003 по 2007 годы и включает концентрации сульфатов в осадках, можно прийти к выводу, что лучшей моделью для этой задачи является Гауссова модель. Корреляция между этой моделью и исходными данными составляет 0,92, что является высоким показателем среди всех созданных интерполяционных моделей. Однако, учитывая небольшое количество станций, не удалось провести интерполяцию на 2007 год с использованием Гауссовой модели. Другие модели продемонстрировали менее удовлетворительные результаты:

- силовая и сферическая модели показали отрицательную корреляцию;
- кубическая модель не смогла провести интерполяцию, и ее результаты невозможно оценить;
- линейная и квадратичная модели оказались наименее качественными, их процент составляет менее 30%, что является низким показателем (табл. 1).

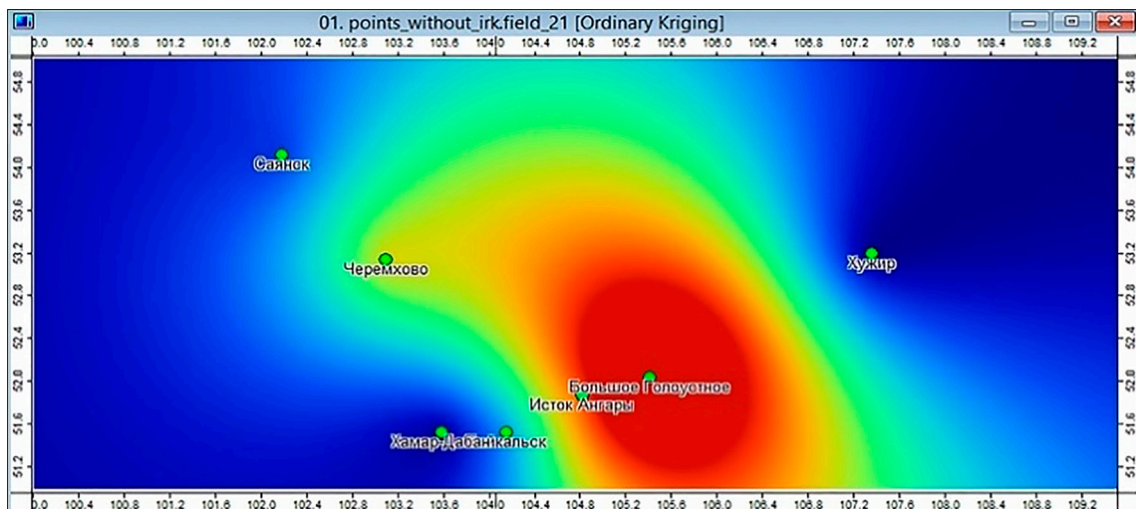


Рис. 2. Результат интерполяции данных измерений компонента XCO на территории Иркутской области в 2020 году

Таблица 1

Сравнение и корреляция модельных данных, полученных при использовании метода кригинга, с исходной информацией (измеренными значениями) для сульфатов на станции Иркутск

Годы	Исходные данные	Линейная («без самородка»)	Гаусса	Логарифмическая	Силовая	Стабильная
2003	6,28	12,82	10,68	10,62		10,68
2004	3,52	8,97	7,23	7,02		7,22
2005	3,44	5,98	5,19	4,51		4,77
2006	3,29	8,31	6,9	6,89		6,89
2007	6,19	4,84		4,13	5,23	4,64
2008	4,5	9,99	13,74	8,84	2318,38	14,49
2009	4,45	6,75	5	6,09	5,67	5,36
2010	7,08	8,91	6,35	8,5	17,07	7,59
2011	4,07	7,12	5,95	6,3	7,24	6,09
2012	4,27	6,38	6,86	6,25	4,72	5,96
2013	5,08	8	5,51	6,53	6,38	7,44
2014	5,35	8,95	8,14	9,02	7,24	7,82
2015	5,41	8,41	6,71	7,74	5,83	7,03
2016	5,53	8,93	6,69	7,91	4,76	8,24
2017	3,75	6,82	5,29	6,14	3,18	5,29
2018	3,64	6,99	8,53	6,71	-3,24	6,69
2019	5,06	7,82	6,03	7,25	5,35	7,59
2020	4,44	9,47	11,06	8,84	7,22	9,02
Корреляция 03 – 20	1	0,32	0,12	0,40	-0,12	0,22
Корреляция 03 – 07	1	0,21	0,92	0,28		0,32
Корреляция 10 – 20	1	0,67	-0,15	0,63	0,81	0,51
Корреляция 08 – 20	1	0,52	-0,14	0,54	-0,10	0,15

Авторами проведен анализ регрессионной статистики с использованием исходных данных и Гауссовой модели. Как и ожидалось, качество интерполяции оказалось на уровне 92%.

Коэффициент детерминации (R-квадрат) составил 0,84, что свидетельствует о том, что в 84% случаев модельные расчеты зависели от исходных значений на соседних станциях. Стандартная ошибка оказалась равной 1,11, что означает отклонение модельных данных от линии регрессии на 1,11 единицы (рис. 3(1)).

Анализируя результаты моделирования сульфатов за период с 2010 по 2020 годы, можно отметить, что силовая модель демонстрирует хорошие показатели корреляции. Коэффициент корреляции равен 0,81, что свидетельствует о качестве модели в 81%. Однако в проинтерполированных данных за 2018 год концентрация имеет отрицательное значение, что противоречит дей-

ствительности. Также следует отметить, что полученные значения в 2010 году были значительно завышены – 17,07 мг/л.

На втором месте по качеству интерполяции расположилась линейная модель «без использования самородка». Ее корреляция с исходными данными составляет 67%, что является вполне удовлетворительным уровнем качества. Коэффициент детерминации равен 44% и демонстрирует, насколько исходные данные влияют на модель функции. Стандартная ошибка составляет 0,81 единицы. Р-значение регрессии меньше 0,05, что свидетельствует о статистической значимости интерполяционной модели (рис. 3(2)).

В ходе следующего эксперимента авторы рассмотрели период с 2003 по 2020 годы. Сравнивая исходные данные с функциями моделей, они пришли к выводу, что ни одна из них не соответствует 50%-му критерию качества.

Регрессионная статистика								
Множественный R	0,91918279							
R-квадрат	0,844897001							
Нормированный R-квадрат	0,767345501							
Стандартная ошибка	1,110011307							
Наблюдения	4							
1) Исходные данные и функция Гаусса (2003 - 2007)								
Дисперсионный анализ								
	df	SS	MS	F	Значимость F			
Регрессия	1	13,42358058	13,42358058	10,89465717	0,08081721			
Остаток	2	2,464250205	1,232125103					
Итого	3	15,88783079						
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
Y-пересечение	1,408517894	1,927404545	0,730784773	0,540926515	-6,884434534	9,701470321	-6,884434534	9,701470321
Переменная X 1	1,474249111	0,44664666	3,300705556	0,08081721	-0,447516358	3,396014581	-0,447516358	3,396014581

1

Регрессионная статистика								
Множественный R	0,667921439							
R-квадрат	0,446119049							
Нормированный R-квадрат	0,384576721							
Стандартная ошибка	0,814911671							
Наблюдения	11							
2) Исходные данные и Линейная функция без самородка (2010 - 2020)								
Дисперсионный анализ								
	df	SS	MS	F	Значимость F			
Регрессия	1	4,813909516	4,813909516	7,248979105	0,024699521			
Остаток	9	5,976729277	0,664081031					
Итого	10	10,79063879						
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
Y-пересечение	4,573621175	1,28925682	3,54748651	0,006240426	1,657119626	7,490122724	1,657119626	7,490122724
Переменная X 1	0,698271623	0,259349831	2,692392821	0,024699521	0,111581545	1,2849617	0,111581545	1,2849617

2

Регрессионная статистика								
Множественный R	0,699267184							
R-квадрат	0,488974594							
Нормированный R-квадрат	0,454906234							
Стандартная ошибка	1,061261369							
Наблюдения	17							
3) Исходные данные и комбинированная функция (Гаусса + Линейная) для 2003 - 2020 гг.								
Дисперсионный анализ								
	df	SS	MS	F	Значимость F			
Регрессия	1	16,1651513	16,1651513	14,35274808	0,001784698			
Остаток	15	16,8941354	1,126275693					
Итого	16	33,05928669						
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
Y-пересечение	3,471976276	1,200403175	2,892341796	0,011166729	0,913377473	6,030575078	0,913377473	6,030575078
Переменная X 1	0,95393153	0,25179649	3,78850209	0,001784698	0,417240015	1,490623045	0,417240015	1,490623045

3

Рис. 3. Регрессионная статистика по сульфатам между исходными данными и модельными расчетами на ст. Иркутск по функциям: 1 – для функции Гаусса (2003–2007 гг.), 2 – Линейная функция (без самородка) (2010–2020 гг.), 3 – Комбинированная функция (Гаусса + Линейная) для 2003–2020 гг.

Кубическая модель наиболее близка к 50% (результат корреляции составляет 48%), однако из 18 лет наблюдения было смоделировано только 6. Из них 5 интерполяции относятся к периоду с 2010 по 2020 годы.

Линейная (без самородка) и логарифмическая модели демонстрируют качество 32% и 40% соответственно. Однако следу-

ет отметить, что хорошие результаты моделирования эти функции показали в период с 2010 по 2020 годы (~60%). В начальный период их корреляционная зависимость была крайне слабой (21–28%).

Таким образом, для оценки качества интерполяции в долгосрочной перспективе (18 лет) имеет смысл использовать различные функции.

Таблица 2

Корреляция модельных данных с исходной информации по нитратам на станции Иркутск методом Кригинга

Годы	Исходные данные	Линейная	Линейная (без самородка)	Кубическая	Экспоненциальная	Гаусса	Логарифмическая	Силовая	Сферическая	Квадратичная	Стабильная
2003	1,65	1,09	1,11			1,10	1,08	1,09		1,09	1,09
2004	1,23	1,23	1,23		1,16		1,21	1,24		1,22	1,21
2005	1,67	0,92	0,72			0,93	0,93			0,93	0,93
2006	1,80	1,15	1,17				1,14			1,14	1,14
2007	2,83	1,16	1,18			1,16	1,16	1,16		1,16	1,16
2008	1,96	1,32	1,51	1,34	1,39	1,25	1,39	1,24	1,37	1,39	1,34
2009	1,67	1,48	1,71	1,48	1,51	1,39	1,52	1,28	1,50	1,52	1,50
2010	2,08	1,68	1,63	2,26	1,51	2,98	1,70	1,69		1,69	1,53
2011	1,60	1,62	1,71	1,65	1,60	1,67	1,64	1,64	1,65	1,64	1,66
2012	1,65	1,86	1,86	2,04	1,70	2,07	1,78	1,74	1,87	1,62	1,82
2013	1,79	1,56	1,62	1,62	1,57	1,53	1,56	1,16	1,59	1,56	1,57
2014	1,91	2,11	1,95	1,90	6,94	1,84	1,41	2,27	2,18	0,88	2,26
2015	3,04	1,80	1,77	1,94	1,77	1,92	1,72	1,52	1,82	1,68	1,80
2016	2,65	1,63	1,58	1,50	1,60	1,57	1,55	1,37	1,49	1,47	1,56
2017	1,74	1,84	1,77	2,03	2,15	2,02	2,07	1,70	1,91	2,08	2,15
2018	1,29	2,15	2,13	2,29	2,29	2,32	1,96	2,34	2,07	2,27	2,54
2019	1,44	1,91	1,93	2,07	3,71	1,98	2,45	5,21	1,90	2,47	1,87
2020	1,71	1,86	2,10	1,97	1,98	1,97	1,92	1,76	2,26	1,91	1,98
Корреляция 03 – 20	1,00	-0,06	-0,10	-0,24	-0,06	-0,11	-0,16	-0,30	-0,27	-0,22	-0,15
Корреляция 03 – 07	1,00	0,04	0,12			0,69	0,09	-0,29		0,06	0,08
Корреляция 10 – 20	1,00	-0,36	-0,52	-0,36	-0,16	-0,14	-0,45	-0,42	-0,37	-0,43	-0,44
Корреляция 08 – 20	1,00	-0,24	-0,45	-0,24	-0,14	-0,08	-0,38	-0,38	-0,27	-0,40	-0,35

В результате эксперимента и анализа корреляции авторы пришли к выводу, что для периода с 2003 по 2020 годы оптимальным решением будет использовать комбинацию Гауссовой и Линейной функций без самородка. Этот метод позволит получить наиболее точные интерполяционные данные по содержанию сульфатов.

Корреляция между исходными данными и результатами модели составила 0,70, а влияние соседних станций на моделирование – 0,48. Для станции Иркутск расчетные данные отклонятся от линии регрессии на 1,06 единицы.

Статистическая значимость F-критерия достигает 0,001%, что говорит о наличии очень сильной и статистически значимой связи между двумя типами данных (рис. 3(3)).

В ходе эксперимента по интерполяции нитратов авторами рассмотрены периоды с 2003 по 2007 годы, с 2010 по 2020 годы и с 2003 по 2020 годы в целом (табл. 2).

Нельзя однозначно утверждать, что какая-либо одна функция идеально подходит для интерполяции, поскольку в двух временных рядах (2003–2007 и 2010–2020) были обнаружены отрицательные значения корреляции.

В период с 2003 по 2007 годы зависимость модельных данных от исходных варьировала от 3 до 11% в зависимости от используемой модели. Поэтому авторы старались подобрать для каждого года наблюдения только ту модель, которая наиболее точно соответствует исходным данным, как показано на рисунке 4.

Регрессионная статистика									
Множественный R	0,716539555								
R-квадрат	0,513428934								
Нормированный R-квадрат	0,478673858								
Стандартная ошибка	0,724380361								
Наблюдения	16								
Дисперсионный анализ									
	df	SS	MS	F	Значимость F				
Регрессия	1	7,751672733	7,751672733	14,77277539	0,001790215				
Остаток	14	7,346176695	0,524726907						
Итого	15	15,09784943							
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%	
У-пересечение	-1,959968148	1,001222559	-1,957574898	0,070519299	-4,107376963	0,187440667	-4,107376963	0,187440667	
Переменная X 1	2,176022203	0,566150995	3,843536833	0,001790215	0,961749085	3,390295322	0,961749085	3,390295322	

Рис. 4. Регрессионная статистика по концентрациям нитратов между исходными данными наблюдений и результатами комбинированных модельных расчетов на ст. Иркутск

В результате авторы объединили несколько интерполяционных моделей в единый ряд: для 2003 и 2005 годов использовалась Гауссова модель; для 2004 и 2009 годов – линейная модель без самородка; для 2006 года – логарифмическая модель; для 2008, 2011 и 2016 годов – линейная модель; для 2010, 2013 и 2014 годов – кубическая модель; для 2017 и 2020 годов – силовая модель; для 2018 года – сферическая модель; для 2019 года – стабильная модель.

Для 2007 и 2015 годов авторам не удалось подобрать подходящую модель интерполяции, так как расхождения между модельными и фактическими данными составили 1,5–2,5 раза.

Объединив различные модели в один ряд и проведя корреляцию с исходными данными, авторы получили качество интерполированного ряда на уровне 71%. Коэффициент детерминированности при этом составил 51%. Стандартная ошибка, отражающая отклонение ряда от прямой линии регрессии, равна 0,72. Уровень значимости F для модельного ряда оказался равным 0,001, что свидетельствует о статистической значимости регрессионной модели (рис. 4).

Выводы

1. Метод кригинга является наиболее приемлемым и информативным для моделирования пространственной интерполяции концентраций загрязняющих веществ в атмосферных осадках на региональном уровне.

2. Для периода с 2003 по 2007 годы, по данным четырех станций химического анализа осадков в Иркутской области, Гауссова функция оказалась лучшей для моделирования концентраций сульфатов на станции Иркутск.

3. Для десятилетия с 2010 года, когда количество станций мониторинга увеличилось до семи, оптимальной функцией стала линейная модель (без учета эффекта самородка).

4. Перекрестная проверка результатов моделирования с исходными данными за весь период с 2003 по 2020 годы выявила слабую корреляционную связь, а при выборе некоторых функций метода кригинга даже показала отрицательные значения корреляции результатов.

5. Для моделирования концентраций нитратов в период с 2003 по 2007 годы отлично подходит Гауссова функция, коэффициент корреляции составляет 0,69. В другие периоды наблюдается отрицательная корреляция по нитратам на станции Иркутск.

Заключение

Исследование показало, что метод кригинга является наиболее эффективным для моделирования пространственной интерполяции концентраций загрязняющих веществ в атмосферных осадках на региональном уровне. Для каждого года наблюдений требуется тщательно подбирать функцию, основываясь на модельной вариограмме.

Результаты исследования позволяют оценить уровень загрязнения атмосферных осадков и выявить источники выбросов. Это, в свою очередь, является основой для разработки и реализации природоохранных мероприятий, направленных на снижение антропогенного воздействия на экосистему.

Полученные данные представляют значительный интерес для ученых и специалистов в области экологии и охраны окружающей среды. Они могут быть использованы для проведения дальнейших научных изысканий и разработки новых методов мониторинга.

Список литературы

1. Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 245 с.
2. Захарян Ю.Г. Геостатистика: Изменение климата и агротехнологии. СПб.: Наука, 2022. 455 с.
3. Nanus L., McMurray D.W., Clow D.W., Saros J.E., Blett T., Gurdak J.J. Spatial variation of atmospheric nitrogen deposition and critical loads for aquatic ecosystems in the Greater Yellowstone Area // *Environmental Pollution*. 2017. Vol. 223. P. 644-656. DOI: 10.1016 /j.envpol.2017.01.077.
4. Першина Н.А., Полищук А.И., Павлова М.Т., Семенов Е.А. Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за 2016-2020 гг.: монография. СПб.: Амирит, 2021. 114 с.
5. Свистов П.Ф., Першина Н.А., Полищук А.И., Павлова М.Т., Семенов Е.С. Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за 2011 – 2015 гг.: монография. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016. 116 с.
6. Васильев А.А., Чашин А.Н., Лобанова Е.С. Пространственное моделирование магнитной восприимчивости почв центральной части г. Перми // *Социально-экологические технологии*. 2021. Т. 11, № 4. С. 450-469. DOI: 10.31862/2500-2961-2021-11-4-450-469.
7. Новикова А.М., Каширина Е.С., Новиков А.А., Полонский А.Б., Панкеева Т.В. ГИС в морских исследованиях: мировой опыт и возможности его применения на примере Черноморского региона // *Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – Природного заповедника РАН*. 2017. № 1(3). С. 54-66. DOI: 10.21072/eco.2021.03.05.
8. Якушев В.П., Буре В.М., Митрофанова О.А., Митрофанов Е.П. К вопросу автоматизации построения вариограмм в задачах точного земледелия // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2020. Т. 16, № 2. С. 177-185. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2020.209.
9. Якушев В.П., Буре В.М., Митрофанова О.А., Митрофанов Е.П. Применение методов геостатистики для анализа целесообразности перехода к технологиям дифференцированного внесения агрохимикатов // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2020. Т. 16, № 1. С. 31-40. DOI: 10.21638/11702/spbu10.2020.103.