

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ В ТУНКИНСКОЙ КОТЛОВИНЕ

А. Л. Киндеев¹⁾, Н. Н. Воропай^{2,3)}, Д. И. Голубец^{2,3)}

1) Белорусский государственный университет, 220030,
Республика Беларусь, Минск, ул. Ленинградская, д. 16,
AKindeev@tut.by

2) Институт Мониторинга Климатических и Экологических Систем СО РАН,
Российская Федерация, г. Томск, пр. Академический, 10/3

3) Институт Географии СО РАН им. В. Б. Сочавы,
Российская Федерация, Иркутск, ул. Улан-Баторская 1,
voropay_nn@mail.ru

2) Институт Мониторинга Климатических и Экологических Систем СО РАН,
Российская Федерация, г. Томск, пр. Академический, 10/3

3) Институт Географии СО РАН им. В. Б. Сочавы,
Российская Федерация, Иркутск, ул. Улан-Баторская 1,
dima.golubets1203@gmail.com

В исследовании представляются результаты апробации методики трехмерного геостатистического моделирования с использованием эмпирического байесовского кригинга 3D-глубины промерзания почвенного покрова в Тункинской котловине. Для анализа использовались значения средних температур за 2013–2015 гг. по глубинам от 0 до 7 м в 19 скважинах. Наилучшей моделью интерполяции стала степенная вариограмма, показавшая наилучшее соответствие с эмпирической вариограммой и доверительными интервалами, что говорит о высокой точности моделирования и возможностях использования полученных результатов в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: вечная мерзлота; температура; геостатистика; ошибки интерполяции.

3D MODELING OF PERMAFROST SPREADING IN THE TUNKA BASIN

A. L. Kindeyev¹⁾, N. N. Voropay^{2,3)}, D. I. Golubets^{2,3)}

1) Belarusian State University, 220030,
Republic of Belarus, Minsk, Leningradskaya St., 16,
AKindeev@tut.by

2) Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS,
Russian Federation, Tomsk, Akademicheskoy Ave., 10/3

3) V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS,
Russian Federation, Irkutsk, Ulaanbaatar St., 1,
voropay_nn@mail.ru

2) Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS,
Russian Federation, Tomsk, Akademicheskoy Ave., 10/3

3) V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS,
Russian Federation, Irkutsk, Ulaanbaatar St., 1,
dima.golubets1203@gmail.com

The study presents the results of testing the methodology of three-dimensional geostatistical modeling using empirical Bayesian kriging of 3D soil freezing depth in the Tunka Basin. The analysis was carried out using average temperature values for 2013–2015 at depths from 0 to 7 m in 19 wells. The best interpolation model was the power variogram, which showed the best agreement with the empirical variogram and confidence intervals, which indicates high accuracy of modeling and the possibility of using the obtained results in further research.

Keywords: permafrost; temperature; geostatistics; interpolation errors.

На исходе XX века проблема изменения климата в сторону глобального потепления стала одной из центральных [1], и ее обсуждение продолжается до сих пор. Одним из наиболее уязвимых к потеплению климата регионов является территория Арктики, в связи с тем, что многие тысячи лет экосистемы формировались в условиях вечной мерзлоты.

Почвы, затронутые вечной мерзлотой, занимают большую часть земель в северных широтах [2]. Потепление климата напрямую влияет на температуру почв, затронутых вечной мерзлотой, и оказывает прямое негативное воздействие на экосистемы Арктики [3]. Ежегодно прогревание слоя вечной мерзлоты становится все больше, что приводит к повышению выбросов углерода и метана от разложения больших запасов ранее замороженного органического материала [4].

На территории России, в частности в Сибири, как и в других регионах Арктики, изучение динамики вечной мерзлоты является актуальной и важной задачей [5]. Нарушение напочвенного покрова и верхних органогенных горизонтов почв приводит к изменению их гидротермических свойств, вызывая избыточный нагрев поверхности в летний период, что фиксируется и в сезонно-талом (СТС) корнеобитаемом слое почвы, и в нижележащих мерзлотных слоях [6]. В связи с этим необходимость изучения распределения температур в естественных экосистемах вечной мерзлоты позволяет смоделировать и спрогнозировать дальнейшее развитие таких систем под воздействием изменения климата.

Исследование проводилось на территории Тункинской котловины (рис. 1) в долине, где ведется ежедневный мониторинг изменения температуры земли с поверхности до глубины 7 м.

Тункинская котловина – система межгорных понижений тектонического происхождения в горах Восточного Саяна в Бурятии, ограниченная хребтами Хамар-Дабана с юга. Тункинская котловина имеет природные особенности: разнообразные формы рельефа от равнинных до альпийских, древнейшие геологические обнажения и современные вулканические образования, выход минеральных источников, разнообразный ландшафт от полупустынных до горнотаетных [7]. Длина Тункинской котловины составляет 65 км, ширина варьируется от 25 до 32 км, общая площадь 1800 км² [8].



Рис. 1. Обзорная карта объекта исследования

Материалами для исследования послужили данные мониторинговых наблюдений за суточным ходом температуры с 2013 по 2015 гг. на глубинах 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 140, 240, 320, 400, 500, 600, 700, 800, 900 и 1000 см. Однако стоит отметить, что измерения до 10,0 м проводятся в 3 скважинах из 19; до 7,0 м – в 1; до 5,0 м – в 3. В остальных наблюдения ведутся до 3,2 м.

Моделирование проводилось в программном продукте ArcGIS Pro с использованием модуля Geostatistic analyst. Возможности данного модуля значительно расширены в ArcGIS Pro по сравнению с ArcGIS ArcMap и позволяют изучать пространственную структуру данных с учетом высот/глубин, а также визуализировать полученные результаты в различных плоскостях.

Трехмерное геостатистическое моделирование основывается на эмпирическом байесовском кригинге. В отличие от других видов кригинга, такой метод автоматизирует трудоемкие процессы подбора вариограммы [9], однако при этом отсутствуют коррекции на анизотропию и лаг. Главной отличительной особенностью байесовского кригинга является использование не одной вариограммы, а множества, которые учитывают неопределенность расчета самих вариограмм, тем самым снижая ошибку интерполяции, что позволяет более корректно оценивать пространственное распределение данных по малым выборкам [10].

Несмотря на большую автоматизацию вариограммного анализа, в эмпирическом байесовском кригинге присутствует ряд условий, которые необходимо подобрать для наилучшего воспроизведения реальной картины распределения изучаемого явления. Как и в обычном кригинге, в основе лежит оценка ошибок интерполяции, таких как: средняя, среднеквадратическая, средняя нормированная, среднеквадратическая нормированная и средняя стандартная ошибка прогноза [11]. Кроме этих показателей,

также существуют дополнительные параметры, присущие только данному виду кригинга (таблица):

1. Средний CRPS – средняя непрерывная ранжированная вероятностная оценка. Это значение должно быть как можно меньше. Чтобы у модели был низкий CRPS, прогнозируемые значения и стандартные ошибки должны быть рассчитаны с высокой точностью и достоверностью.

2. В пределах интервала 90 процентов – процент измеренных значений, входящих в 90 % интервал прогнозирования. Это значение должно быть близко к 90. Этот показатель указывает, насколько стандартные ошибки совпадают с прогнозируемыми значениями. Значения выше 90 указывают на то, что стандартные ошибки слишком велики по отношению к прогнозированным значениям. Значения ниже 90 указывают на то, что стандартные ошибки слишком малы.

3. В пределах интервала 95 процентов – процент измеренных значений, входящих в 95 % интервал прогнозирования. Это значение должно быть близко к 95. Этот показатель указывает, насколько стандартные ошибки совпадают с прогнозируемыми значениями [12].

Ошибки интерполяции эмпирического байесовского кригинга

Показатель	Вариограммы					
	Линейная	Степенная	Плоский сплайн	Экспоненциальная	Уиттла	К-Бесселя
Количество	322					
Средний CRPS	0,1493	0,1466	0,1609	0,1423	0,1357	0,1360
В пределах интервала 90 %	95,9627	95,6521	96,6292	95,6521	95,6521	96,2732
В пределах интервала 95 %	97,2049	97,515	97,3782	96,8944	97,2049	97,2049
Средняя	0,0012	0,0024	-0,0036	0,0006	-0,0010	0,0011
Ср. квадр.	0,3208	0,3170	0,3084	0,3139	0,3106	0,3086
Средняя норм.	-0,0024	-0,0017	-0,0100	-0,0068	-0,0042	0,00004
Среднеквадр. нормированная	0,7938	0,7927	0,6622	0,8093	0,8371	0,8347
Средняя стандартная ошибка	0,4186	0,4208	0,4653	0,4217	0,3918	0,3990

Примечание. Лучшие показатели ошибок выделены полужирным шрифтом.

Основываясь на ошибках интерполяции, можно заметить, что разница между моделями несущественна и колеблется в одинаковых диапазонах значений показателя, что является одним из преимуществ эмпирического байесовского кригинга. При этом выделяется экспоненциальная вариограмма, по трем позициям показавшая результат чуть лучший, чем другие, Уиттла – также по трем, и К-Бесселя – по двум.

При этом не столь значимые различия (в сотые, а иногда и в тысячные) предполагают, кроме количественной оценки, проведение качественной, т. е. сопоставление математической вариограммы с эмпирической (рис. 2).

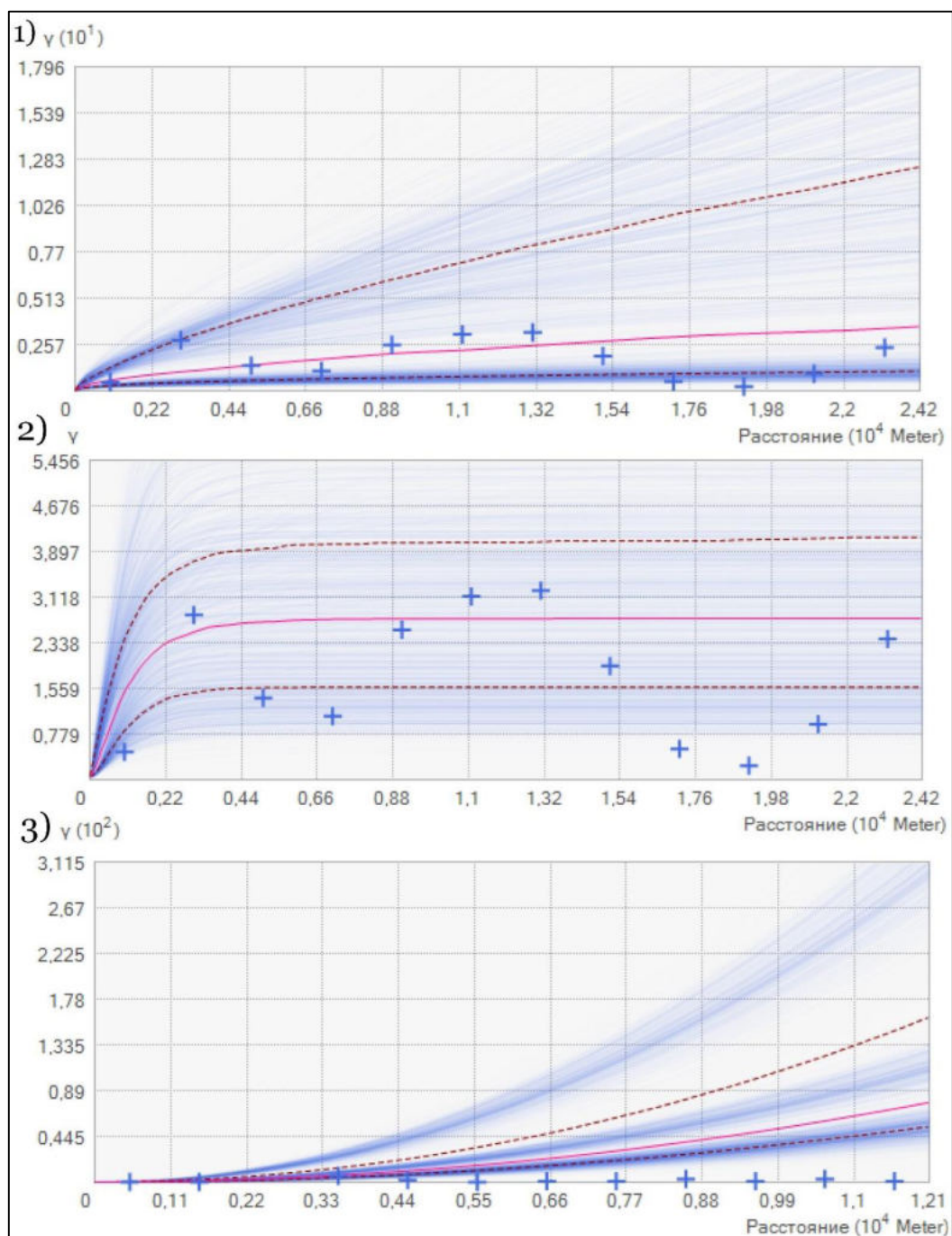


Рис 2. Модель вариограммы: 1 – степенной; 2 – плоского сплайна; 3 – К-Бесселя средних температур вечной мерзлоты в долине Тункинской котловины

Для всех вариограмм остальные настройки оставались неизменными: выборка для поднаборов составила 100 значений с коэффициентом перекрытия выборок, равным 5, тип сектора – октаэдр с числом соседей от 5 до 6. Число моделируемых вариограмм составило 500 шт.

Исходя из рисунка, очевидно, что, несмотря на ошибки интерполяции, вариограммы К-Бесселя соответствуют эмпирической вариограмме только на малых расстояниях (4 крестика из 12). Лучше выглядит вариограмма плоского сплайна – несмотря на значительные колебания эмпирической вариограммы, половина входит в доверительные интервалы. Использование же степенных вариограмм позволяет достичь наилучшего соответствия модели с эмпирическими данными, что и послужило главным критерием выбора именно этих вариограмм для построения трехмерных вокселей температур (рис. 3).

Представление пространственной информации в формате вокселей (netCDF) позволяет визуализировать данные в трехмерном виде. Так, на 3D-картограмме № 1 представлена вся интерполяционная объемная поверхность с эффектом прозрачности. Также данный формат позволяет строить различные сечения (срезы) поверхности (№ 2), чтобы анализировать изменения внутри пространства.

Так, можно наблюдать, что непосредственно вечная мерзлота на протяжении всего периода сохраняется от поверхности до глубин только в центре долины. С глубины 2,0 м и ниже ареал минусовых температур расширяется на юг, при этом непосредственно на глубинах 3,2 м средняя температура сохраняется около 0, но ниже не опускается.

Также существует возможность визуализации данных в виде изоповерхностей – своеобразных объемных изолиний. На данном рисунке проведены 4 изоповерхности, отражающие температуры от 0 до 4 °С.

На основании проведенного исследования можно заключить, что развитие геостатистических методов позволяет охватывать все больше предметных областей исследования пространственных данных. Моделирование байесовским кригингом позволяет в значительной мере автоматизировать и улучшить результаты вариограммного анализа, однако при этом фактор экспертной оценки по-прежнему играет ключевую роль в правильности подбора моделей.

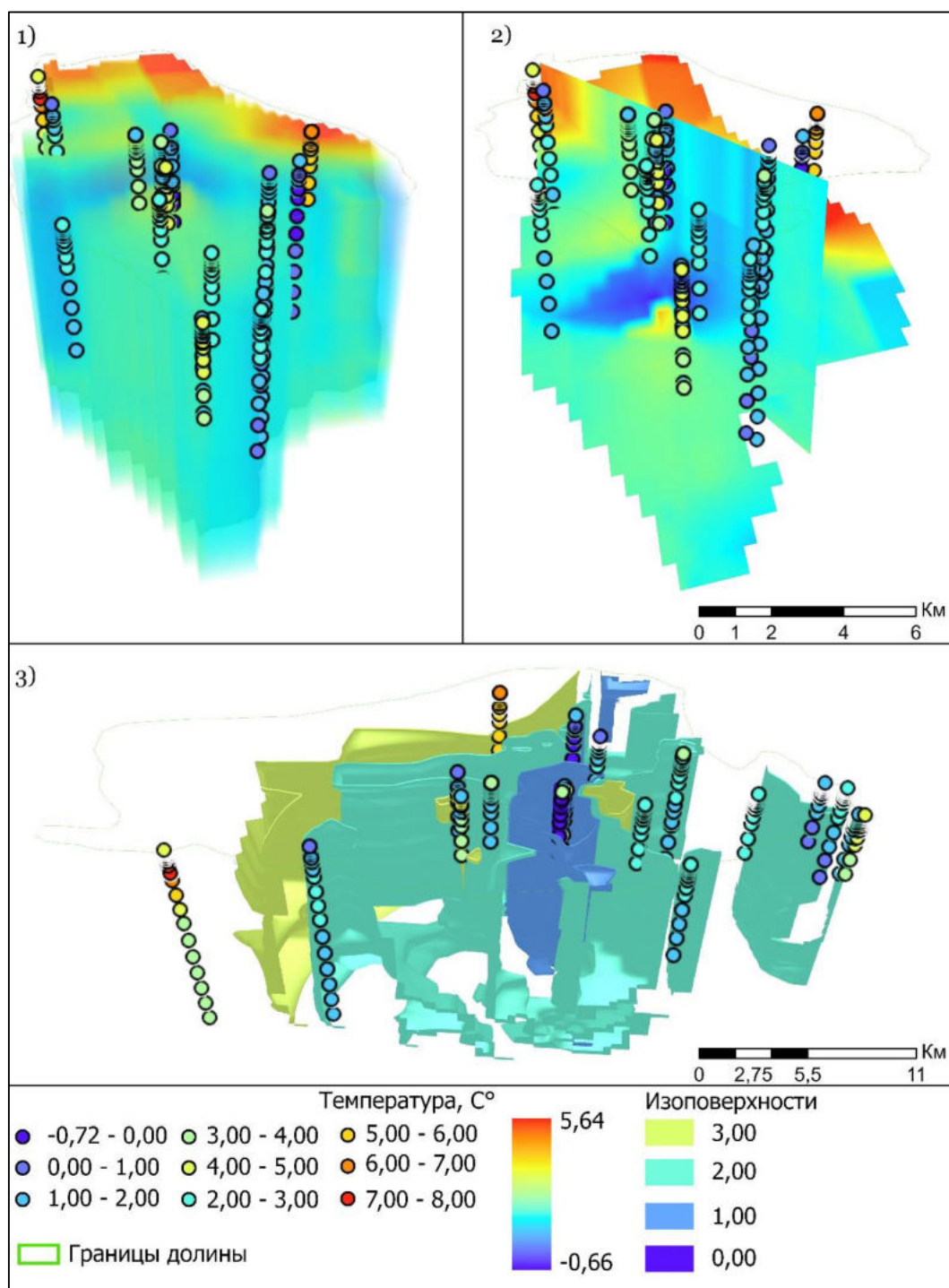


Рис 3. Трехмерная модель – 1; срезы – 2; изоповерхности распространения вечной мерзлоты в долине Тункинской котловины – 3

В рамках дальнейших изысканий представляются актуальными сопоставление полученных результатов с дневной поверхностью рельефа, изучение сезонных колебаний температур и среднесрочное прогнозирование динамики вечной мерзлоты.

Библиографические ссылки

1. Анисимов О. А., Нельсон Ф. Э. Прогноз изменения мерзлотных условий в северном полушарии: применение результатов балансовых и транзитивных расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы // Криосфера Земли. 1998. № 2. С. 53–57.
2. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere / T. Zhang [et al.] // Polar Geogr. 1999. Vol. 23. P. 132–154.
3. Climate change damages to Alaska public infrastructure and the economics of proactive adaptation / A. M. Melvin [et al.] // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2017. Vol. 114. P. 122–131.
4. The expanding footprint of rapid Arctic change / T. A. Moon [et al.] // Earth's Future. 2019. Vol. 7. P. 212–218.
5. Десяткин Р. В., Десяткин А. Р., Федоров П. П. Температурный режим мерзлотно-таежных почв Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2012. № 16 (2). С. 70–78.
6. Тепловое состояние нарушенных почв в криолитозоне Сибири на основе дистанционных данных и численного моделирования / Т. В. Пономарева [и др.] // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27, №. 3. С. 16–35.
7. Ахаржанова Т. В. Геоэкологические особенности ландшафтов Тункинской котловины : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.36. Улан-Удэ : Бурятский государственный университет, 2005. 21 с.
8. Выркин В. Б. Кузьмин В. А., Снытко В. А. Общность и различия некоторых черт природы Тункинской ветви котловин // География и природные ресурсы. 1991. № 4. С. 61–68.
9. ArcGIS Pro [Электронный ресурс]. Что такое эмпирический байесовский кригинг? URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/what-is-empirical-bayesian-kriging-.htm> (дата обращения: 01.12.2024).
10. Pilz J., Spöck G. Why do we need and how should we implement Bayesian kriging methods // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2008. Vol. 22. P. 621–632.
11. Киндеев А. Л., Клебанович Н. В. Методика учета почвенно-агрохимического потенциала для оптимизации структуры землепользования Воложинского района Республики Беларусь // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2024. Т. 79. № 2. С. 63–72.
12. ArcGIS Pro [Электронный ресурс]. Использование перекрестной проверки для оценки результатов интерполяции. URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/performing-cross-validation-and-validation.htm> (дата обращения: 01.12.2024).