

DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-4
УДК 303.732.4

© Рапакوف Г.Г., Лебедева Е.А., Горбунов В.А.,
Кузьминов А.Л., Абдалов К.А., 2018

Рапакوف Георгий Германович

Кандидат технических наук, доцент
Вологодский государственный университет
(Вологда, Россия)
E-mail: grapakov@yandex.ru

Rapakov Georgij Germanovich

PhD in Technical Sciences, Associate
Professor, Vologda State University
(Vologda, Russia)
E-mail: grapakov@yandex.ru

Лебедева Елена Александровна

Кандидат технических наук, доцент,
Вологодский государственный университет
(Вологда, Россия)
E-mail: lebedeva.elena@inbox.ru

Lebedeva Elena Aleksandrovna

PhD in Technical Sciences, Associate
Professor, Vologda State University
(Vologda, Russia)
E-mail: lebedeva.elena@inbox.ru

Горбунов Вячеслав Алексеевич

Доктор физико-математических наук,
профессор,
Вологодский государственный университет
(Вологда, Россия)
E-mail: gorbunov1945@inbox.ru

Gorbunov Vyacheslav Alekseevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
professor, Vologda State University
(Vologda, Russia)
E-mail: gorbunov1945@inbox.ru

Кузьминов Александр Леонидович

Доктор технических наук, профессор,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: TSiTB@chsu.ru

Kuzminov Aleksandr Leonidovich

Doctor of Technical Sciences, professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: TSiTB@chsu.ru

Абдалов Кенгес Абдалович

Доктор медицинских наук, заведующий
хирургическим отделением,
Вологодская городская больница № 1
(Вологда, Россия)
E-mail: muzgb1@inbox.ru

Abdalov Kenges Abdalovich

Doctor of Medicine,
Vologda municipal hospital №1
(Vologda, Russia)
E-mail: muzgb1@inbox.ru

**КОМПЬЮТЕРНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ
МЕТОДОВ СЕТОЧНОЙ
ИНТЕРПОЛЯЦИИ
ПРИ ОБРАБОТКЕ
ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ
ДАННЫХ**

**COMPUTER MODELLING
AND GRIDDING METHODS
ANALYSIS
FOR GEOINFORMATION
DATA PROCESSING**

Аннотация. В публикации исследованы методы пространственной интерполяции в ходе обработки данных геоэкологического мониторинга. При помощи компьютерного моделирования проведено сопоставление алгоритмов гридинга. Для оценки точности методов вычислены значения остатков. На

Abstract. The article describes research results of the comparison of gridding techniques during implementation of the Vologda city ecological monitoring. To study accuracy evaluation of the main gridding algorithms, authors used the computer simulation. An application of geostatistical methods for spatial interpola-

основе визуальной оценки гридинга и статистического анализа невязок для пространственной визуализации отобран метод кригинга. Выполнен расчет поверхности невязки и идентифицированы резко выделяющиеся значения экспериментальных величин – аномальные геохимические зоны. Построена карта изолиний удельной электропроводности фильтра снежного покрова г. Вологды, что способствует решению региональных проблем рационального природопользования.

Ключевые слова: машинное моделирование, гридинг, кригинг, геоинформатика, геоэкологический мониторинг, поддержка решений

tion of snow cover electrical conductivity is suggested. For constructing isoline map point kriging is used. Visualization helps outlier data detection. The results may be used for decision support of regional water conservation project.

Keywords: computer modeling, gridding methods, kriging, geoinformatics, geoecological monitoring, decision support

Введение

Применение дискретных сеток широко распространено в практике компьютерного моделирования. Расчет тепловых процессов при непрерывном литье заготовок в задачах металлургии, на базе метода конечно-разностной аппроксимации предполагает дискретизацию расчетной области прямоугольной сеткой [4]. Алгоритмы построения регулярной сетки на основе неструктурированных исходных данных активно востребованы в задачах анализа пространственных данных. Выбор метода сеточной интерполяции – гридинга – требует системного подхода и зависит от решаемой проблемы [2]. Экологически устойчивое развитие урбанизированных территорий нуждается в количественных оценках химического загрязнения при проведении гуманитарной экспертизы как базовой составляющей социального аудита [1], [6]. Актуальной является задача моделирования методов сеточной интерполяции для оценки химического загрязнения среды обитания при поддержке управленческих решений по снижению загрязнений воздушного бассейна, сбору и утилизации снега. Практическая значимость исследования обусловлена использованием результатов в региональном проекте улучшения качества водоснабжения населения. Целью настоящей работы является исследование методов гридинга на основе машинного моделирования. Визуализация результатов геоэкологического мониторинга повышает эффективность формирования управленческих стратегий при комплексных исследованиях качества среды обитания, что обуславливает новизну работы.

Основная часть

Методологической основой рационального природопользования и охраны окружающей среды является системный подход и комплексный анализ показателей качества среды обитания для разработки и принятия управленческих решений. Экологические исследования демонстрируют, что риски здоровью населения от химического загрязнения среды обитания коррелируют с уровнем загрязнения снежного покрова. Накапливающийся в течение холодного периода года снег является аккумулятором загрязнений атмосферы [5], [7].

Пробы снега были отобраны в период начала весеннего снеготаяния в марте 2017 г. Координаты точек определялись путем моделирования геопространственной сетки с учетом данных об общественном здоровье (рис. 1 а). Объем выборки обеспе-

чивает точность оценки не ниже 5 % с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$. Кригинг объединяет алгоритмы линейной пространственной регрессии и обеспечивает наилучшую в статистическом смысле пространственную оценку в классе линейных интерполяторов, которая обладает минимальной вариацией ошибки. В случае оценивания значения непрерывной переменной Z , представленной в виде набора $\{z(x_i), i = 1, \dots, n\}$ из n измерений в точках $x_1, x_2, \dots, x_n$, модели кригинга – это варианты базового линейного регрессионного оценщика $Z^*(x)$.

$$Z^*(x) - m(x) = \sum_{i=1}^{n(x)} \lambda_i(x) [Z(x_i) - m(x_i)],$$

где $\lambda_i(x)$ – весовые коэффициенты для данных $z(x_i)$; $m(x)$ и $m(x_i)$ – математические ожидания случайных переменных $Z(x)$ и $Z(x_i)$. Количество данных для оценки и значения весовых коэффициентов может меняться при перемене местоположения точки оценки x .

Погрешность интерполяции оценивают при помощи невязки — разности между эмпирическими и расчетными значениями $\Delta Z(x)$. Экстремумы невязки идентифицируют пространственные вариации и позволяют выявлять аномальное поведение данных.

$$\Delta Z(x) = Z(x) - Z^*(x).$$

В этом случае методы гридинга сравниваются на основе суммы квадратов остатков:

$$S = \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)]^2.$$

Меньшим S отвечает лучшее приближение. Используется коэффициент согласия R^2 :

$$R^2 = 1 - S / S_0; S_0 = \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - m]^2; m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z(x_i).$$

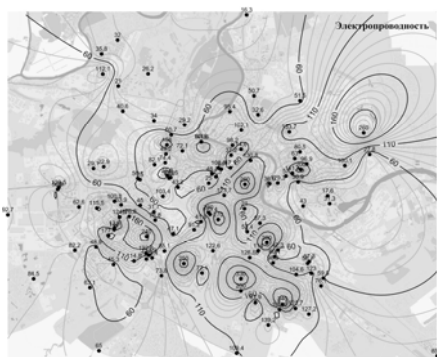
Чем ближе величина R^2 к единице, тем выше качество подгонки [3], [10].

Анализ современного состояния исследований проблемы основан на обзоре публикаций в научной литературе. В работе [7] обсуждаются результаты особенности распределения рН и электропроводности снежного покрова на селитебной территории и в промышленной зоне г. Братска. Для пространственной интерполяции использовался алгоритм естественного соседства. Обоснование выбора метода и оценка его точности не рассматривались. Публикация [2] замечательна тем, что органично сочетает высокий научный уровень и тщательное изложение методики исследования. Из 4 методов гридинга, которые упоминаются в статье, в модельном эксперименте применяется кригинг. Авторы [3] выполнили сравнительный валидационный анализ 6 геостатистических методов пространственного моделирования по данным экологического мониторинга радиоактивного загрязнения почвы Am^{241} . Методы обеспечили близкие результаты, хорошо согласующиеся с распределением валидационных данных. Представлен обзор геостатистического ПО. Сопоставление метода

обратных расстояний с 6 другими интерполяторами при обработке данных, имеющими разброс, представлено в [8]. Работа [9] знакомит с результатами сравнения методов кригинга и обратных расстояний в степени 1, 2 и 4 для картографирования параметров почвы. Валидационный анализ продемонстрировал преимущество кригинга. Авторы [11] сравнили 8 методов гридинга с использованием модели гравитационного поля и продемонстрировали необходимость привлечения контурных карт.



а)



б)

Рис. 1. Карты: сбора точечных проб (а); изолиний электропроводности (б)

Верификация непрерывных покрытий выполняется как качественно — на основе визуального оценивания (рис. 2), так и количественно — при помощи сравнения результатов частотного анализа невязок для методов гридинга (табл. 1). Модель на основе радиальных базисных функций (РБФ) показала минимальные значения стандартного отклонения и суммы квадратов остатков, максимальное — для коэффициента согласия. Наихудшие результаты демонстрирует метод метрики данных: величины среднего значения, сигмы и суммы квадратов для него максимальны, а коэффициент согласия принимает минимальное значение. Реализации моделирования с использованием методов метрики данных, скользящего среднего, полиномиальной регрессии и локального многочлена показывают худшие результаты по сигме, сумме квадратов и коэффициенту согласия. Альтернативу предлагают процедуры РБФ, ближайшего соседа и модифицированного метода Шепарда. Они являются предпочтительными по данным показателям перед другими интерполяторами. Методы минимальной кривизны, линейной интерполяции на основе триангуляции, кригинга, обратных расстояний в степени и естественного соседа являются ближайшими к ним. Процедуры линейной интерполяции на основе триангуляции и естественного соседа оставили не оцененными значительные области по краям полученных покрытий. Построение по методу обратных расстояний в степени формирует артефакты.

Метод кригинга демонстрирует высокую визуальную привлекательность пространственного распределения с четкой равномерной структурой и малой зашумленностью. Он полностью промоделировал расчетную область. Стандартное отклонение невязки кригинга в 2 раза меньше ее среднего значения по множеству интерполяторов. Средние значения сигмы и коэффициента согласия для сравниваемых методов составили 29,297 и 0,838 соответственно. Из 12 процедур гридинга к моделям наилучшего выбора отнесены кригинг и метод РБФ.

Частотный анализ невязки электропроводности для методов гридинга

Показатели невязки для методов гридинга	Среднее значение	Стандартное отклонение	Процентиль, 50 %	Минимум	Максимум	Сумма квадратов остатков	Коэффициент согласия
Метрики данных	93,116	66,294	80,135	13,302	335,963	1 550 386	0,0333
Обратных расстояний в степени	-0,088	15,606	-1,862	-65,193	49,320	29 470	0,9816
Кригинг	-0,009	15,585	-1,247	-67,459	50,139	29 390	0,9817
Локальный многочлен	1,391	57,501	-8,401	-85,683	197,484	400 305	0,7504
Минимальной кривизны	-0,032	12,956	-0,597	-48,644	49,761	20 312	0,9873
Модифицированный метод Шепарда	0,078	8,280	-0,227	-34,692	44,937	8 296	0,9948
Скользящего среднего	-0,458	65,950	-13,676	-80,196	244,283	526 309	0,6718
Естественного соседа	-0,112	17,742	-2,093	-73,497	49,769	34 944	0,9782
Ближайшего соседа	0,274	8,091	0,000	-45,018	40,580	7 930	0,9951
Полиномиальной регрессии	0,000	62,785	-16,756	-84,053	211,795	476 975	0,7026
Радиальных базисных функций	0,196	4,825	-0,131	-11,358	15,834	2 821	0,9982
Линейной интерполяции на основе триангуляции	0,497	15,944	-0,766	-52,362	59,774	28 245	0,9824

Карта изолиний удельной электропроводности снегового фильтрата с интервалом между изолиниями 10 мк См/см наглядно отображает зоны вариации электропроводности и выделяет ее локальные максимумы (рис. 1 б). Контрастные аномалии значений выявляют источники загрязнения — ареалы с повышенной нагрузкой загрязняющих примесей и выступают характеристикой техногенного воздействия на окружающую среду.

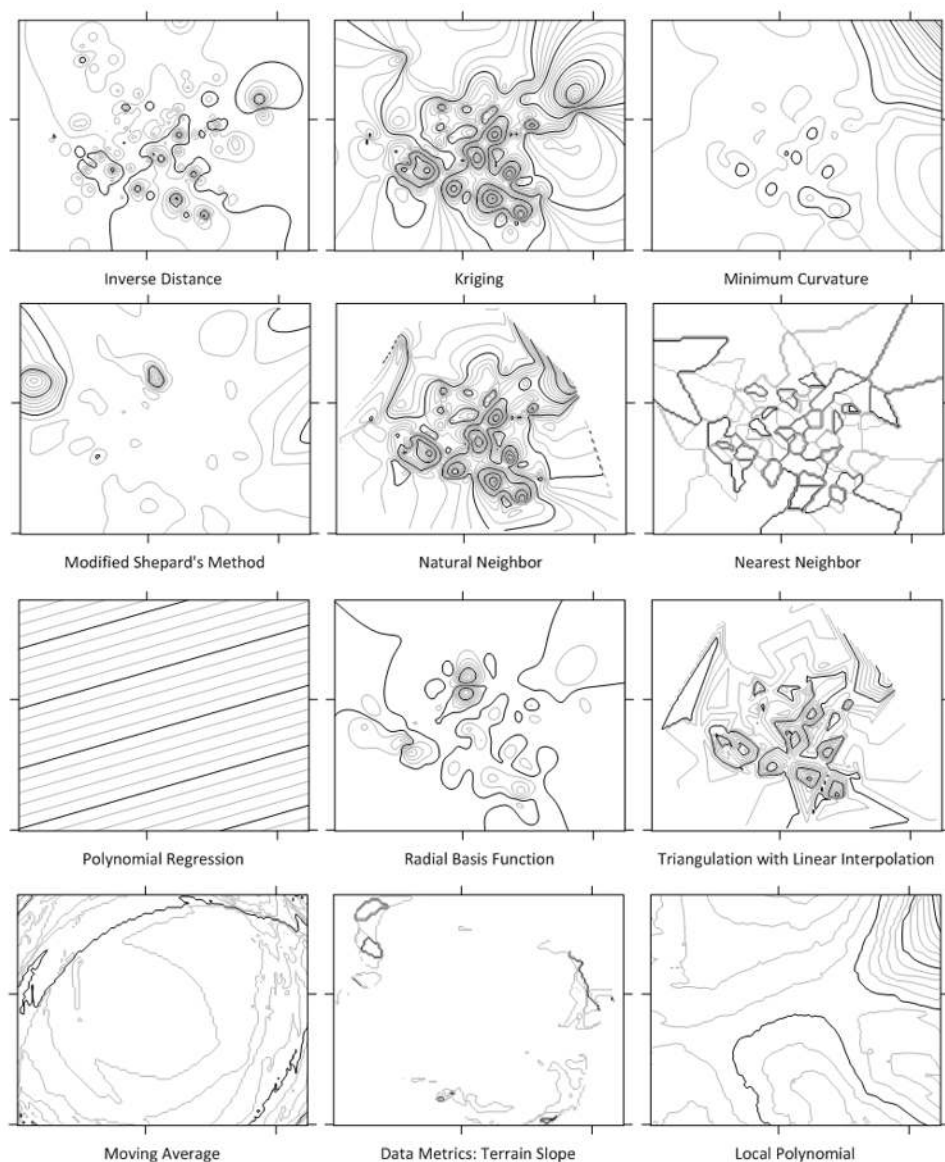


Рис. 2. Исследование методов гридинга для распределения электропроводности

Карта совместного пространственного распределения удельной электропроводности и точечных значений невязок представлена на рис. 3 а. Полутоновое изображение наглядно воспроизводит закономерности и демонстрирует локальные атмо-геохимические максимумы. Поверхность невязок позволяет оценить достоверность результатов по ее пространственной структуре и абсолютным значениям ошибки (рис. 3 б). Средняя невязка для метода кригинга составляет $-0,009$. Для всего набора интерполяторов без учета выпадающего значения метрики данных — $0,158$. Визуальная локализация минимальных и максимальных невязок обеспечивает обнаруже-

ние неожиданных пространственных эффектов — выбросов. Аномалии отвечают адресам проб с номерами 99 и 51.

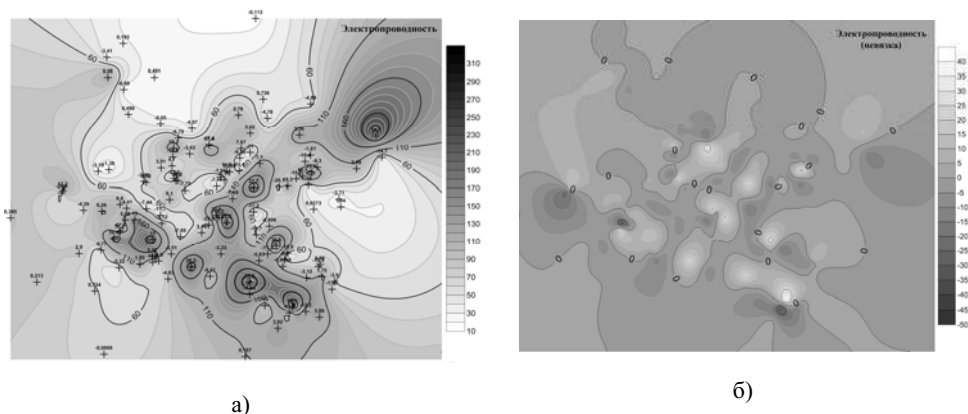


Рис. 3. Распределение для метода кригинга: электропроводности (а); ее невязки (б)

Выводы

В статье рассмотрены методы пространственной интерполяции. Выполнено компьютерное моделирование для 12 алгоритмов расчета регулярной сетки при обработке данных геоэкологического мониторинга. Для оценки точности процедур интерполяции применяется частотный анализ вычисленных значений невязок. Геоинформационное картографирование результатов выполнено в виде карты изолиний при помощи метода кригинга. Анализ пространственного распределения остатков позволяет обнаружить выпадающие значения — атмогеохимические аномалии. Дальнейшие перспективы исследования связаны с кросс-валидацией пространственных распределений, полученных методом кригинга и применением различных моделей вариограмм.

Литература

1. Афанасьев Д.В., Кузьминов А.Л., Маралов В.Г., Чернов А.В. Региональный классический университет и проблемы обеспечения безопасности среды // Безопасность жизнедеятельности. 2011. № 5. С. 4–11.
2. Бузук Г.Н. Гриндинг в ботаническом ресурсоведении: модельный эксперимент и методика // Вестник фармации. 2016. № 2 (72). С. 55–63.
3. Демьянов В.В., Савельева Е.А., Арутюнян Р.В. Геостатистика: теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.
4. Лукин С.В., Кибардин А.Н., Антонова Ю.В. Алгоритм оценки параметров теплового состояния сляба на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь» // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. № 5 (80). С. 25–36.
5. Рапаков Г.Г., Лебедева Е.А., Абдалов К.А., Горбунов В.А. Исследование метода пространственных ассоциативных правил в задаче медико-экологического мониторинга // Физико-математическое моделирование систем: Материалы XVIII Международного семинара. Воронеж, 2017. Ч. 1. С. 149–156.
6. Шестакова Е.А., Калугина Н.Ф., Шестаков Н.И., Аншелес В.Р. Об особенностях применения технологии микрофильтрации для доочистки сточных вод МУП «Водоканал» г. Череповца.

повца // Череповецкие научные чтения – 2016: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Череповец. 2017. С. 221–222.

7. Янченко Н.И., Баранов А.Н., Ершов В.А., Тимкина Е.В. Изменение pH и электропроводность снежного покрова Братска // Системы. Методы. Технологии. 2014. №3(23). С. 190–192.

8. Franke R. Scattered Data Interpolation: Tests of Some Methods. American Mathematical Society, 1982. Vol. 38 (157). Pp. 181–200. DOI: 10.1090/S0025-5718-1982-0637296-4

9. Gotway C.A., Ferguson R.B., Hergert G.W., Peterson T.A. Comparison of Kriging and Inverse-Distance Methods for Mapping Soil Parameters. Soil Science Society of America Journal, 1996. Vol. 60 (4). Pp. 1237–1247. DOI: 10.2136/sssaj1996.03615995006000040040x

10. Montero J-M., Fernandez-Aviles G., Mateu J. Spatial and Spatio – Temporal Geostatistical Modeling and Kriging. John Wiley & Sons, Ltd., 2015. 385 p.

11. Nagy D., Franke R., Battha L., Kalmar J., Papp G., Zavoti J. Comparison of Various Griding Methods. Acta Geodaetica et Geophysica. 1999. Vol. 34 (1–2). P. 41–51. DOI: 10.1007/BF03325556

References

1. Afanas'ev D.V., Kuz'minov A.L., Maralov V.G., Chernov A.V. Regional'nyi klassicheskii universitet i problemy obespecheniia bezopasnosti sredy [Regional classical university and problem of safe environment]. *Bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti* [Life safety], 2011, no. 5, pp. 4–11.

2. Buzuk G.N. Griding v botanicheskom resursovedenii: model'nyi eksperiment i metodika [Griding in the botanical resources: model experiment and technique]. *Vestnik farmatsii* [Bulletin of pharmacy], 2016, no. 2 (72), pp. 55–63.

3. Dem'ianov V.V., Savel'eva E.A., Arutiunian R.V. *Geostatistika: teoriia i praktika* [Geostatistics: the theory and practice]. Moscow: Science, 2010. 327 p.

4. Lukin S.V., Kibardin A.N., Antonova Yu.V. Algoritm otsenki parametrov teplovogo sostoiianiia sliaba na linii “MNLZ – termostat – nagrevatel'naia pech” [Algorithm of slab heat state parameters evaluation on the line “CCM – thermostat – heating stove”]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepoves state university bulletin], 2017, no. 5 (80), pp. 25–36.

5. Rapakov G.G., Lebedeva E.A., Abdalov K.A., Gorbunov V.A. Issledovanie metoda prostranstvennykh assotsiativnykh pravil v zadache mediko-ekologicheskogo monitoringa [Spatial association rules analysis in problem of the medical-ecological monitoring]. *Fiziko-matematicheskoe modelirovanie sistem: materialy XVIII mezhdunarodnogo seminara* [Physico-mathematical system modeling: XVIII international seminar materials]. Voronezh: Voronezh state technical university, 2017, part 1, pp. 149–156.

6. Shestakova E.A., Kalugina N.F., Shestakov N.I., Ansheles V.R. Ob osobennostiakh primeneniia tekhnologii mikrofil'tratsii dlia doochistki stochnykh vod MUP «Vodokanal» g. Cherepovtsa [About features of application the microfiltration technology for additional cleaning of sewage MUP "Vodokanal" Cherepovets city]. *Cherepovetskie nauchnyie chteniia – 2016: materialy vserossiiskoi nauchno – prakticheskoi konferentsii* [Cherepovets scientific readings – 2016: materials of the all-Russian scientific – practical conference]. Cherepovets: Cherepoves State University, 2017, pp. 221–222.

7. Ianchenko N.I., Baranov A.N., Ershov V.A., Timkina E.V. Izmenenie pH i elektroprovodnost' sneznogo pokrova Bratska [Changing pH and conductivity of the snow cover in the city of Bratsk]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2014, no. 3(23), pp. 190–192.

8. Franke R. Scattered Data Interpolation: Tests of Some Methods. *American Mathematical Society*, 1982, vol. 38 (157), pp. 181–200. DOI: 10.1090/S0025-5718-1982-0637296-4

9. Gotway C.A., Ferguson R.B., Hergert G.W., Peterson T.A. Comparison of Kriging and Inverse-Distance Methods for Mapping Soil Parameters. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, vol. 60 (4), pp. 1237–1247. DOI: 10.2136/sssaj1996.03615995006000040040x

10. Montero J-M., Fernandez-Aviles G., Mateu J. Spatial and Spatio – Temporal Geostatistical Modeling and Kriging. *John Wiley & Sons, Ltd.*, 2015. 385 p.

11. Nagy D., Franke R., Battha L., Kalmar J., Papp G., Zavoti J. Comparison of Various Grid-
ding Methods. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 1999, vol. 34 (1–2), pp. 41–51. DOI:
10.1007/BF03325556
-

Для цитирования: Рапаков Г.Г., Лебедева Е.А., Горбунов В.А., Кузьминов А.Л., Абдалов К.А. Компьютерное моделирование и анализ методов сеточной интерполяции при обработке геоинформационных данных // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. №2(83). С. 31–39. DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-4

For citation: Rapakov G.G., Lebedeva E.A., Gorbunov V.A., Kuzminov A.L., Abdalov K.A. Computer modelling and gridding methods analysis for geoinformation data processing. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2018, no. 2 (83), pp. 31–39. DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-4