

УДК 510.67: 528: 554

DOI 10.31429/vestnik-19-1-35-41

Использование ГИС-технологий и цифровой модели рельефа для исследования пространственных процессов

А. В. Павлова¹✉, И. С. Телятников²

¹ Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, Краснодар, 350040, Россия

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, пр-кт Чехова, 41, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

✉ Павлова Алла Владимировна; e-mail: pavlova@math.kubsu.ru

В работе рассматриваются возможности применения геоинформационных технологий и цифровых моделей в решении задач экологического мониторинга территорий. Авторы использовали разработанную в КубГУ цифровую модель рельефа горных и прибрежных районов Краснодарского края для картографического моделирования процессов миграции загрязнителя. Описаны возможности использования модели и приложения для экологического мониторинга и построения прогностических моделей. Рассмотрена модель рассеяния и переноса загрязняющей субстанции в атмосфере. Распространение загрязнителей в потоке воздушных масс описывается нестационарным уравнением конвекции-диффузии. С использованием построенной цифровой модели территории Краснодарского края расчетные данные могут быть визуализированы в привязке к карте.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА ГИС, цифровая модель рельефа, экологический мониторинг, диффузия, миграция примеси.

ФИНАНСИРОВАНИЕ Фрагменты работы выполнены при поддержке ГЗ ЮНЦ РАН проект (00-20-13) № 122020100341-0, а также РФФИ и Администрации Краснодарского края (проект 19-41-230005_p_a).

ПОЛУЧЕНО 7 марта 2022 г. **ПРИНЯТО** 21 марта 2022 г. **ПУБЛИКАЦИЯ** 30 марта 2022 г.

ЦИТИРОВАНИЕ Павлова А. В., Телятников И. С. Использование ГИС-технологий и цифровой модели рельефа для исследования пространственных процессов // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2022. Т. 19. № 1. С. 35–41. DOI 10.31429/vestnik-19-1-35-41

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы внесли одинаковый вклад в подготовку рукописи.

© Автор(ы), 2022. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Using of GIS Technologies and a Digital Elevation Model for the Study of Spatial Processes

Alla V. Pavlova¹✉, Ilya S. Telyatnikov²

¹ Kuban State University, Stavropolskaya str., 149, Krasnodar, 350040, Russia

² Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Prospekt Chekhova, 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia

✉ Alla V. Pavlova; e-mail: pavlova@math.kubsu.ru

In the paper we consider the possibilities of using geoinformation technologies and digital models in solving problems of environmental territory monitoring. The purpose of the work is to demonstrate the use of geoinformation technologies and digital models in solving problems of the spatial processes modeling. The authors used a digital model of the relief for the mountainous and coastal regions of the Krasnodar territory developed at the Kuban State University for cartographic modeling of pollutant migration processes. The possibilities of using the model and application for the environmental monitoring and creation of forecast models are described.

GIS have proven effective in demographic studies, transport infrastructure development, mineral exploration, seismological and environmental monitoring, natural disaster forecasting, etc., but GIS themselves are not designed for independent 3D modeling. For environmental models, an important role is played not so much by spatial geodata as by the characteristics of the studied process obtained as the results of modeling aggregated in GIS. The paper considers a model of dispersion and transport for a pollutant in the atmosphere. The distribution of pollutants in the flow of air masses is described by a non-stationary convection-diffusion equation.

Using the constructed digital model of the territory of the Krasnodar region, the calculated model data is visualized in relation to the map. With the help of built-in tools, when working with attributive and graphical information, it is possible to integrate the results of modeling with digital model maps in the range of parameters significant for practice.

KEYWORDS GIS, digital elevation model, environmental monitoring, diffusion, migration of impurities.

FUNDING Some fragments of the work were carried out with the support of the GDZ of the UNC RAS project (00-20-13) No. 122020100341-0, and the RFBR and the Administration of the Krasnodar Territory (project 19-41-230005_p_a).

RECEIVED 7 March 2022. **ACCEPTED** 21 March 2022. **PUBLISHED** 30 March 2022.

CITE AS Pavlova A. V., Telyatnikov I. S. Using of GIS technologies and a digital elevation model for the study of spatial processes. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 35–41. DOI 10.31429/vestnik-19-1-35-41

The author(s) declare no competing interests. The author(s) contributed equally.

© The Author(s), 2022. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\) license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Введение

В настоящее время подходы к разработке направленных на предупреждение и ликвидацию стихийных бедствий и их последствий информационных систем развиваются чрезвычайно активно. При разработке прогностических моделей различного уровня и назначения актуальны программы, позволяющие работать с геопространственной информацией, используемые в качестве инструмента накопления и предварительной обработки необходимых для дальнейшего использования данных. Геопространственные методы и технологии находят приложения в проектах развития транспортной инфраструктуры, управлении недвижимостью, в исследовании демографических процессов и исторического наследия, разведке и добыче полезных ископаемых, экологическом и сейсмологическом мониторинге, прогнозировании стихийных бедствий (пожаров, паводков и пр.) и т.д. [1–6 и др.].

Использование цифровых карт как эффективного инструмента для принятия решений способствует информационному обеспечению природоохранной деятельности, совместному планированию мероприятий различных служб при ликвидации чрезвычайных ситуаций и разработке стратегии их предупреждения, в том числе в целях повышения ситуационной осведомленности об экологических угрозах.

Настоящая работа посвящена исследованию и демонстрации возможных инструментов картографического моделирования на примере созданной цифровой модели рельефа (ЦМР) местности для прибрежных и горных районов Краснодарского края [7, 8] с использованием технологии географических информационных систем (ГИС).

1. ЦМР региона и программа 3D-моделирования рельефа

Краснодарский край обладает уникальной природно-климатической системой, ландшафтным и биологическим разнообразием. На прибрежной территории края расположены ценные в экологическом и научном отношении природные комплексы. Кроме того, на Кубани функционируют многочисленные промышленные предприятия, активно развиваются курортно-рекреационная и туристская отрасли. Краснодарский край — зона активного земледелия, важный геополитический и экономический регион России, на его территории располагается целый ряд объектов ответственного назначения, поэтому экологический и сейсмологический мониторинг имеют для региона особое значение.

Для мониторинга территории края построена ЦМР как средство цифрового представления ландшафтных данных [7, 8]. Пространственное разрешение цифровой модели местности определяется площадью моделируемой территории и необходимой детализацией имеющихся данных. Использована топографическая основа из 29 листов данных в формате покрытий ArcInfo масштаба 1 : 200 000, охватывающая территорию края. Построение ЦМР местности территории Краснодарского края и ее предварительный анализ выполнены по данным топоосновы с использованием модулей Spatial Analyst и 3D Analyst. Использование этих модулей позволило произвести редактирование TIN-поверхностей, интерполяцию высот, построение изолиний, вычисление уклонов поверхностей и экспозиции склонов и другие стандартные подготовительные действия.

Для отображения экстенгов данных в ArcView GIS использована проекция Гаусса – Крюгера, что для решаемого класса задач в масштабах края дает приемлемую точность моделиро-

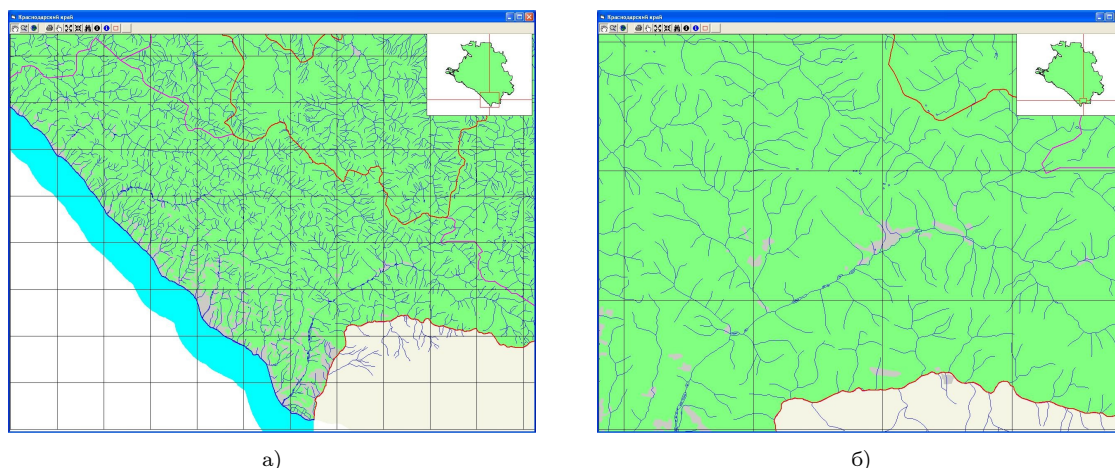


Рис. 1. Вид окна картографического модуля с окном локатора для разного уровня детализации:
а — Сочинский район; б — Красная Поляна

вания рассматриваемых процессов. Представление местности разбито на участки размером 10×10 км [7]. Верификация тематических слоев топоосновы, редактирование пространственных и атрибутивных данных выполнялось в ArcView Gis и ArcEditor.

Программа может работать в одном из двух режимов: картографическом и режиме 3D визуализации. В первом случае в окне отображается карта региона, состоящая из нескольких тематических слоев, включая координатную сетку, сетку меридианов и параллелей, соответствующую разбивке территории на стандартные листы топокарт, слой населенных пунктов, административные и государственные границы, слои гидрографии (озера, лиманы, водохранилища, реки, каналы и т.п.), и некоторые другие слои. При необходимости можно повышать и понижать уровень детализации. При этом отображение (или отключение отображения) тех или иных слоев зависит от выбранного масштаба. На рис. 1 представлены окна программы с картой Сочинского района (рис. 1а) и Красной Поляны и ее окрестностей (рис. 1б).

Основное назначение карты в данной программе — идентификация положения моделируемых участков рельефа местности, но благодаря интеграции данных топографические, структурные и прочие данные отображаются в одном окне, при этом некоторые слои могут быть не вполне завершенными по составу входящих объектов. Однако при необходимости они могут быть дополнены и детализированы посредством внешней корректировки используемой картографической информации, а также дополнены геологическими и экологическими данными без вмешательства в саму программу [7].

Интерактивное отображение трехмерной модели рельефа местности выбранного участка, а также анализ его поверхности можно проводить в режиме 3D визуализации (рис. 2). Созданный интерфейс обеспечивает возможность изменения масштаба поверхности и угла наблюдения. Функционал приложения позволяет изменять способ отображения поверхности, задавая непрерывный или дискретный режим отображения, выбирая черно-белую или цветную палитру. Зоны моделирования можно менять, не переходя в картографический режим, а выбирая их номер в раскрывающемся списке, расположенном в нижней части окна.

Аппроксимации, реализованные в ЦМР для моделирования рельефа, позволяют использовать модель не только для визуального анализа, но и для представления различных наборов двумерных и трехмерных данных и специальных расчетов. Полученные два типа моделей поверхностей используются для построения уточненной ЦМР, адаптированной к использованию совместно с другой информацией в качестве источника входных данных для оригинальных расчетных модулей, выполняющих их проблемно-ориентированную обработку. Предусмотрена возможность представления информации о пространственных процессах, происходящих на территории Краснодарского края.

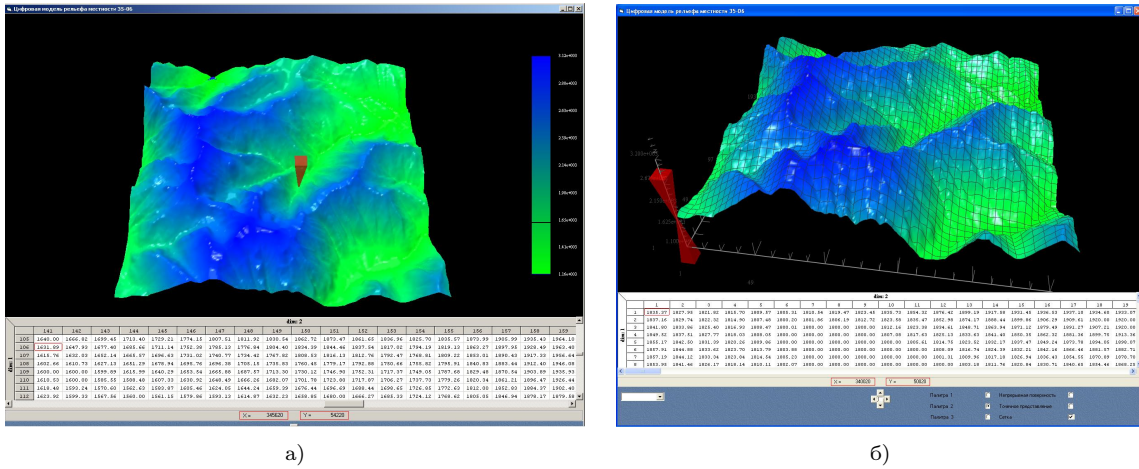


Рис. 2. Интерактивная 3D модель для выбранного участка для разных углов наблюдения: а — без сетки, б — с сеткой

2. Моделирование миграции загрязнителей с использованием ГИС-технологий

Для изучения процессов миграции загрязнителей на территории региона используется построенная в КубГУ цифровая модель рельефа местности для горных и прибрежных районов Краснодарского края [7, 8] и разработанные технологии создания интерактивной модели местности.

На сегодняшний день для оценки антропогенной нагрузки на окружающую среду активно применяются различные модели атмосферной кинетики и динамики аэрозолей и газообразных примесей, в том числе с учетом химического взаимодействия и фазовых переходов. Ведущее место в разработке таких моделей занимают ИВМ РАН и ИВМ СО РАН [9–12 и др.]. Но многие разработки зачастую весьма затратны по использованию вычислительных мощностей.

В реализованной на настоящий момент модели распространение загрязнителей в потоке воздушных масс описывается нестационарным уравнением конвекции-диффузии с учетом возможных трансформаций, а также гравитационного осаждения в области $\Omega_t = \{\Omega \times [0, T]\}$, где $\Omega = \{-L_1 < x_1 < L_1, -L_2 < x_2 < L_2, 0 < x_3 < H\}$,

$$\frac{\partial \varphi_n}{\partial t} + (\mathbf{u}_n, \text{grad} \varphi_n) + (\mathbf{B}\varphi)_n = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial x_j^2} + f_n(\mathbf{x}, t), \quad n = \overline{1, N}. \quad (2.1)$$

В (2.1) приняты следующие обозначения: $\varphi = \{\varphi_n\}$ — вектор концентраций составляющих многокомпонентной примеси, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$; $\mathbf{u}_n = \{u_1, u_2, u_3 - u_{gn}\}$, где u_j — компоненты вектора скорости по осям Ox_j соответственно ($j = \overline{1, 3}$), K_j — коэффициенты диффузии в тех же направлениях. Вектор скорости воздушных масс учитывает величину u_{gn} — скорости осаждения n -го компонента сложного загрязнителя под действием силы тяжести. Составляющие скорости атмосферных масс обычно определяются из системы уравнений гидротермодинамики, в данной модели ветровые характеристики считаются заданными (постоянными), что является оправданным в ряде случаев. Функция $f_n(\mathbf{x}, t)$ описывает мощность и область источника n -го компонента загрязнителя, оператор $\mathbf{B}\varphi$ — трансформации составляющих многокомпонентной примеси.

Задается начальное распределение загрязнителей, условия выхода примесей на фоновые значения на верхней и боковых границах рассматриваемой области и условие частичного поглощения и отражения — на подстилающей поверхности с учетом ландшафтных особенностей территории.

В работе не рассматривается вторичное загрязнение атмосферы, загрязняющие вещества считаются пассивными, т.е. не взаимодействующими между собой. Некоторые из компонентов

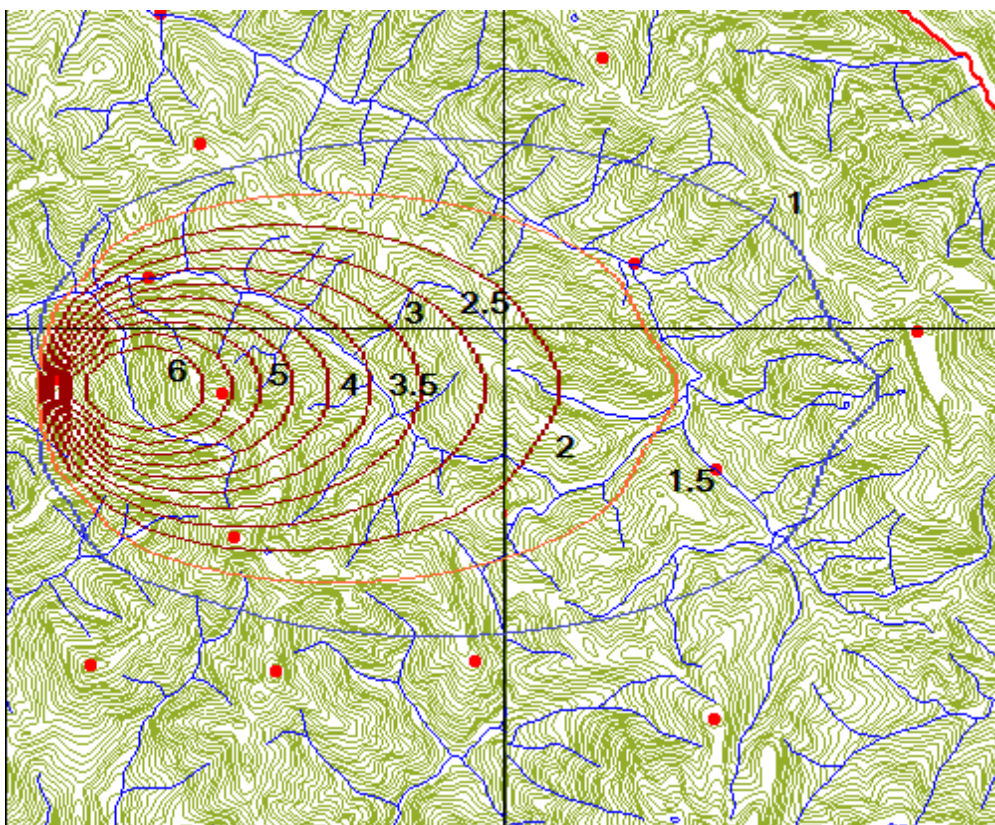


Рис. 3. Пример пространственной привязки результатов численного моделирования без учета рельефа местности

не претерпевают изменения в процессе миграции, другие — разлагаются на составляющие атмосферы. При этом матрица \mathbf{V} является диагональной, $\mathbf{V} = \|\sigma_{nk}\|$ ($\sigma_{nk} = 0, n \neq k$), σ_{nk} — коэффициент деградации n -го загрязняющего вещества. В таком случае задача распадается на N несвязных начально-граничных задач. Для решения каждой из них вводится сеточная область $D_\tau^{\Delta x}$. Решение строится путем расщепления по процессам. На первом этапе рассматривается перенос примеси, на втором — диффузия, на третьем — деградация загрязнителей (если она имеет место). С помощью схемы Кранка–Николсона [13, 14] строится численное решение задачи рассеяния и переноса многокомпонентной загрязняющей примеси в атмосфере.

Результатом численной реализации модели являются поля концентрации итоговых загрязняющих веществ, рассчитанные с заданной точностью. Предусмотрена также возможность построения сечений поля концентраций загрязнителей при фиксации одной из пространственных переменных. На рисунке показан пример горизонтального сечения поля концентрации одного из компонентов примеси для модельных данных через 2 ч. после начала моделирования на высоте 300 м. Взяты следующие параметры числовой сетки: $\tau = 600$ с, $\Delta x_j = 2000$ м ($j = 1, 2$), $\Delta x_3 = 100$ м. Информация о значении концентрации загрязнителя графически отображается в системе в виде точечного слоя (рис. 3).

Подключение новых данных происходит автоматически во время каждого запуска системы посредством использования файла определенной структуры, заполнение которого данными может выполняться как в ручном, так и автоматическом режимах.

С использованием данных о рельефе территории может рассматриваться задача переноса и диффузии газовых и аэрозольных субстанций в условиях сильно пересеченной местности. При этом ЦМР региона служит географически координированной основой для описания реальных расчетных областей. Реализован алгоритм экспорта орографических данных выбранной

области в расчетный модуль в формате текстовых файлов .txt.

Для учета рельефа вводится новая система координат $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3)$, где $\bar{x}_1 = x_1$, $\bar{x}_2 = x_2$, $\bar{x}_3 = H(x_3 - \sigma(x_1, x_2))(H - \sigma(x_1, x_2))^{-1}$, H — высота верхней границы рассматриваемого атмосферного слоя, (x_1, x_2, x_3) — декартова система координат, функция $\sigma(x_1, x_2)$ описывает рельеф [11]. Уравнение рассеяния и миграции загрязнителя в новых координатах решается в области: $D_t = D \times [0, T]$, где $D = \{(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3) : \bar{x}_1 \in [-X, X], \bar{x}_2 \in [-Y, Y], \bar{x}_3 \in [0, H]\}$. Метеорологические параметры в пределах $\bar{x}_3 \in [0, H]$ считаются постоянными, однокомпонентный загрязнитель деградирует в процессе рассеяния.

Построение аппроксимации функции рельефа основано на методе интерполяции функций многих переменных. Для приближения по каждой из переменных используются полиномы Лагранжа. Введены следующие базисные функции:

$$u_l(x_1) = \prod_{k=1, k \neq l}^n \frac{x_1 - x_{1,k}}{x_{1,l} - x_{1,k}}, \quad v_j(x_2) = \prod_{k=1, k \neq j}^m \frac{x_2 - x_{2,k}}{x_{2,j} - x_{2,k}}.$$

Интерполяционная функция имеет следующий вид:

$$P\sigma(x_1, x_2) = \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^m \gamma_{l,j} w_{l,j},$$

где $\gamma_{l,j} = \sigma(x_{1,l}, x_{2,j})$, $w_{i,j}(x_1, x_2) = u_i(x_1)v_j(x_2)$.

Ведется разработка специализированных модулей на основе математических моделей распространения примесей с учетом орографии, которые будут объединены в специализированном ГИС-приложении.

Заключение

Средства цифрового представления трехмерных пространственных данных в настоящее время широко используются в различных сферах деятельности. ГИС играет роль ключевого компонента реализации моделей динамических процессов и представления результатов моделирования в пространственном контексте. ГИС доказали свою эффективность в проектах по исследованию демографических процессов, развития транспортной инфраструктуры, разведке полезных ископаемых, сейсмологическом и экологическом мониторинге, прогнозировании стихийных бедствий и т.д. [1–6]. Сами ГИС не предназначены для независимого трехмерного моделирования. Для моделей окружающей среды важную роль играют не столько пространственные геоданные, сколько характеристики исследуемого процесса как результаты моделирования, агрегированные в ГИС.

В работе рассматривается модель рассеяния и переноса загрязняющей субстанции в атмосфере. Распространение загрязнителей в потоке воздушных масс описывается нестационарным уравнением конвекции-диффузии. Решение строится путем расщепления по процессам. С использованием построенной в КубГУ цифровой модели территории Краснодарского края расчетные данные могут быть визуализированы в привязке к карте.

Использованы технологии создания специализированных ГИС-приложений на языках высокого уровня, поддерживающих технологию СОМ, для картографического моделирования. В дальнейшем планируется реализация расширений, позволяющих осуществлять не только экспорт в ГИС данных пространственно-временного распределения загрязнений из расчетного модуля, а также экспорт/импорт атрибутивных данных из других источников, в том числе данных сейсмического мониторинга территории края.

Литература [References]

1. Longley P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W. *Geographic information systems and science*. New York: John Wiley & Sons, 1999.

2. Kelle R., Baru Ch. *Geoinformatics: cyberinfrastructure for the solid earth sciences*. Cambridge: University Press, 2011.
3. Clarke K.C., Brad O.P., Crane M.P. *Geographic information systems and environmental modeling*. London: Pearson, 2001.
4. Li Y., Brimicombe A.J. Assessing the quality implications of accessing spatial data: the case for GIS and environmental modelling. *GISRUK Proceedings*, 2002, pp. 68–71.
5. Кошкарёв А.В. Эффективное управление пространственными метаданными и геосервисами в инфраструктурах пространственных данных. *Пространственные данные*, 2008, № 1, с. 28–35.
6. Митакович С.А. Прогнозирование распространения лесного пожара в ArcGIS. *ГИС: теория и практика*. ArcGIS 10.1, 2012, № 3. [Mitakovich S.A. Predicting wildfire spread in ArcGIS. *GIS: teoriya i praktika = GIS: theory and practice*. ArcGIS 10.1, 2012, no. 3. (in Russian)] Retrieved from <https://arcreview.esri-cis.ru/2012/08/11/predict-forest-fire-with-gis/>
7. Павлова А.В., Гладской И.Б. Разработка цифровой модели территории региона для экологического и сейсмического мониторинга края. *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*, 2020, № 5, с. 45–48. [Pavlova A.V., Gladskoy I.B. Development of a digital model of the region's territory for ecological and seismic monitoring of the region. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse = Environmental protection in the oil and gas industry*, 2020, no. 5, pp. 45–48. (in Russian)]
8. Гладской И.Б., Павлова А.В., Телятников И.С. Использование ГИС-технологий и цифровой модели рельефа для исследования процессов в геологических структурах региона. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2020, т. 17, № 2, с. 29–35. [Gladskoy I.B., Pavlova A.V., Telyatnikov I.S. Use of GIS technologies and digital elevation model to study processes in the geological structures of the region. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 29–35. (in Russian)]
9. Марчук Г.И. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. Наука, Москва, 1982. [Marchuk G.I. *Matematicheskoe modelirovanie v probleme okruzhayushchey sredy = Mathematical modeling in the environmental problem*. Nauka, Moscow, 1982. (in Russian)]
10. Пененко В.В., Алоян А.Е. *Модели и методы для задач охраны окружающей среды*. Наука, Новосибирск, 1985. [Penenko V.V., Aloyan A.E. *Modeli i metody dlya zadach okhrany okruzhayushchey sredy = Models and methods for environmental problems*. Nauka, Novosibirsk, 1985. (in Russian)]
11. Алоян А.Е. *Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере*. Наука, Москва, 2008. [Aloyan A.E. *Modelirovanie dinamiki i kinetiki gazovykh primesey i aerorozley v atmosfere = Modeling the dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere*. Nauka, Moscow, 2008. (in Russian)]
12. Агошков В., Асеев Н.А., Новиков И.С. *Методы исследования и решения задач о локальных источниках при локальных или интегральных наблюдениях*. ИВМ РАН, Москва, 2015. [Agoshkov V., Aseev N.A., Novikov I.S. *Metody issledovaniya i resheniya zadach o lokal'nykh istochnikakh pri lokal'nykh ili integral'nykh nablyudeniyyakh = Methods for studying and solving problems about local sources in local or integral observations*. INM RAS, Moscow, 2015. (in Russian)]
13. Хакимзянов Г.С., Черный С.Г. *Методы вычислений. Ч. 3: Численные методы решения задач для уравнений параболического и эллиптического типов*. Новосиб. гос. ун-т., Новосибирск, 2007. [Khakimzyanov G.S., Cherny S.G. *Metody vychisleniy. Ch. 3: Chislennyye metody resheniya zadach dlya uravneniy parabolicheskogo i ellipticheskogo tipov = Computation methods. Part 3: Numerical methods for solving problems for equations of parabolic and elliptic types*. Novosib. state un-t., Novosibirsk, 2007. (in Russian)]
14. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. *Численные методы решения задач конвекции-диффузии*. Книжный дом “Либроком”, Москва, 2015. [Samarsky A.A., Vabishchevich P.N. *Chislennyye metody resheniya zadach konveksii-diffuzii = Numerical methods for solving convection-diffusion problems*. Book house “Librokom”, Moscow, 2015. (in Russian)]