

МЕХАНИКА

УДК 528.91:539.3

DOI: 10.31429/vestnik-17-2-29-35

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ И ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ РЕГИОНА

Гладской И. Б., Павлова А. В., Телятников И. С.

THE APPLICATION OF GIS TECHNOLOGIES AND A DIGITAL ELEVATION MODEL IN THE STUDY OF THE REGIONAL GEOLOGICAL STRUCTURE PROCESSES

I. B. Gladskoy¹, A. V. Pavlova¹, I. S. Telyatnikov²¹ Kuban State University, Krasnodar, 350040, Russia² Southern Scientific Center, Russian Academy of Science, Rostov-on-Don, 344006, Russia
e-mail: pavlova@math.kubsu.ru

Abstract. To study wave and deformation processes in lithospheric structures as complex deformable objects as well as seismic monitoring of the region, we have proposed the use of the Krasnodar region Digital elevation model (DEM). As a tool for visualization, analysis and elevation models transformation through special type surface approximation to a view that allows further use of calculation modules, a prototype software application has been developed. When modeling mountain massifs with a block structure, we also provided built-in modules for changing the accuracy of digital model thus allowing to reduce the amount of data.

As a result of further developments, it is planned to turn the GIS into a general interface which will allow us to work with both existing and new software tools for calculation and evaluation of the characteristics of the geological structures stress-strain state using various approaches, an interface for interacting with seismic monitoring systems allowing to effectively solve analysis and spatial data visualization problems, as well as to create cartographic materials. On their basis, in the future, we'll also be able to conduct the evaluation of landslide situations in crossed areas. Using the built-in tools when working with attributive and graphical information, it will be possible to integrate simulation results and location data with maps.

Keywords: GIS, digital elevation model, seismic and environmental monitoring.

Введение

Кубань — важный экономический и геополитический регион России. Краснодарский край на сегодняшний день составляет серьезную конкуренцию в части предоставления услуг по туризму, отдыху и санаторно-курортному обслуживанию ведущим зарубежным центрам. В этой связи вопросы мониторинга и оценки сейсмической ситуации региона являются исключительно актуальными.

Наиболее сейсмогенным слоем является верхняя часть земной коры. Построение адекватных моделей разноранговых сегментов

земной коры остается актуальным в силу того, что механизмы землетрясений определяются не только глобальными, но и региональными, и локальными уровнями взаимодействия сеймотектонических структур литосферы. На сегодняшний день проблеме создания адекватных моделей строения системы разномасштабных литосферных структур для разных регионов уделяется большое внимание, при этом исследуются различные признаки формирующихся очагов землетрясений, вызванных взаимодействием локальных геологических образований [1–5 и др.]. Выделение в системе блоковой делимости земной

Гладской Игорь Борисович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета, директор Центра информационной безопасности Кубанского государственного университета; e-mail: i.glad@list.ru.

Павлова Алла Владимировна, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета; e-mail: pavlova@math.kubsu.ru.

Телятников Илья Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории математики и механики Южного научного центра РАН; e-mail: ilux_t@list.ru.

Отдельные фрагменты работы выполнены в рамках ГЗ ЮНЦ РАН (проект №01201354241) и при частичной поддержке РФФИ и Администрации Краснодарского края (проект 19-41-230005).

коры сейсмогенерирующих структур обосновывается обычно по результатам интерпретации геолого-геофизических материалов. При этом изучение данных и анализ результатов моделирования с учетом их пространственной привязки предоставляет новые возможности развития моделей и широкого использования информационных ресурсов ГИС.

Учеными Кубанского государственного университета и Южного научного центра Российской академии наук активно развивается механическая концепция оценки сейсмичности, в основе которой лежит анализ возможных механизмов и сценариев нарастания напряжений у границ разломов или в зонах контакта литосферных отдельных частей.

Созданные в настоящее время технологии позволяют получать важные геофизические данные, необходимые для постановки задач исследования волновых и деформационных процессов в геологических структурах, с другой стороны, результаты оценки напряженно-деформированного состояния моделируемых структур могут быть инсталлированы в ГИС-карты.

1. Цифровая модель территории региона для сейсмического и экологического мониторинга

В настоящее время пространственный анализ используется в различных областях научной и производственной деятельности. Анализ риска стихийных бедствий, добыча полезных ископаемых, экологический и сейсмический мониторинг и т.д. широко применяют геопространственные методы и технологии и их приложения [6–8 и др.].

Цифровые карты — универсальный и полезный инструмент для поддержки взаимодействия и принятия решений. Их использование способствует эффективному планированию мероприятий в различных областях деятельности, в том числе прогнозировании и предупреждении чрезвычайных ситуаций.

Подходы к созданию информационных систем, направленных на предупреждение стихийных бедствий и ликвидацию их последствий, претерпевают существенные изменения, требуя полноценного анализа географической информации. При разработке прогнозистических моделей различного уровня и назначения актуальны программы, позволяющие работать с геопространственной информацией, используемые как средство накопле-

ния и инструмент предварительной обработки необходимых для дальнейшего использования данных. Для исследования территориальных природных процессов ГИС-технологии позволяют создать цифровые модели рельефа (ЦМР) [9, 10].

В данной работе была использована технология создания специализированных ГИС-приложений на языках высокого уровня, поддерживающих технологию СОМ, с использованием библиотеки MapObjects (ESRI), элементов управления Avis 2D Control, Avis Grid Control (Digital Equipment Corporation) и подключением вспомогательных модулей, реализованных на других языках программирования, отличных от языка разработки основной программы (например, расчетных модулей на фортране и С). Эта технология была реализована в прикладной инструментальной программе 3D-моделирования рельефа на основе данных, полученных на предварительном этапе моделирования [11].

Для исследования природных процессов, экологического и сейсмического мониторинга территории Краснодарского региона выполнено построение подробной ЦМР. Для моделируемой территории, охватывающей горные и прибрежные районы края, разработана технология создания интерактивной 3D модели рельефа [11]. Для этого были проведены верификация и редактирование топографической основы из 29 листов представленных в географических координатах цифровых данных (в формате покрытий ArcInfo масштаба 1 : 200 000), охватывающей территорию края.

Введя декартову систему координат, представление местности в ArcView GIS было построено в проекции Гаусса – Крюгера и разбито на участки размером 10×10 км (рис. 1).

С помощью расширений SpatialAnalyst и 3D Analyst для визуализации и анализа поверхностей были получены TIN (Triangulated Irregular Network — нерегулярная триангуляционная сетка) и GRID (Grid — регулярная матрица значений высот, полученная при интерполяции исходных данных) представления рельефа территории для всех участков. При этом точечные слои отметок высот служили исходными данными для моделирования рельефа. Для удобства использования данных моделирования другими приложениями представление рельефа в TIN формате было преобразовано в матрицы высот в узлах сетки, покрывающей каждый участок, шаг

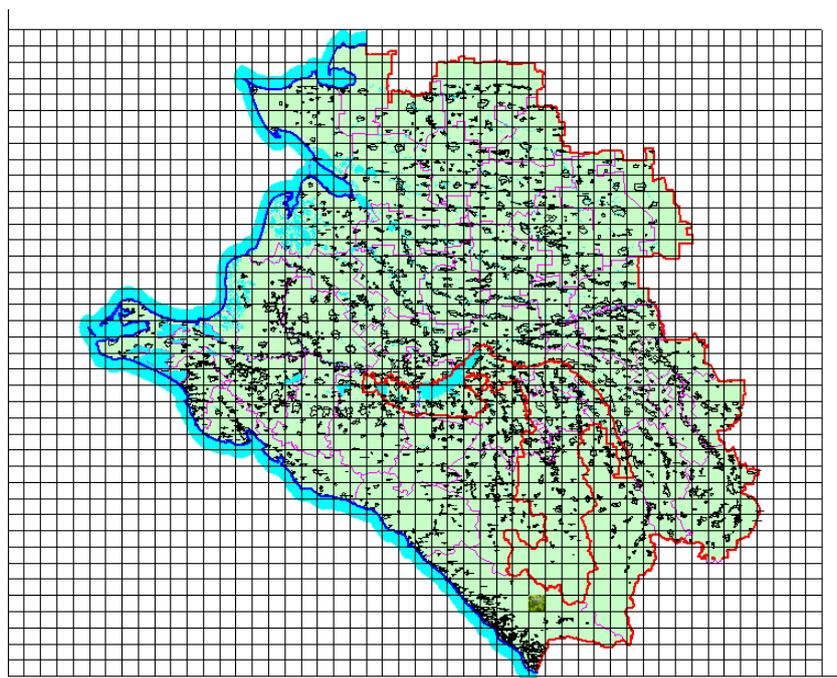


Рис. 1. Зоны (10×10 км) цифрового моделирования рельефа

которой составил 40 м. Таким образом, для каждого участка данные представлялись в файле 62500-ю значениями регулярной матрицы высот, сопоставленными координатам 62 500-и точек. На основе этих данных была построена «осредненная» модель рельефа горных массивов и прибрежных районов территории Краснодарского края.

Зоны (ячейки координатной сетки с шагом 10 км) пронумерованы по следующему правилу: первые две цифры представляют номер столбца (считая от начала введенной декартовой системы координат в положительном направлении), в котором расположена ячейка, а две последних цифры — номер строки (рис. 2).

В качестве инструмента для визуализации, анализа и преобразования моделей рельефа посредством аппроксимации поверхностями специального типа к виду, допускающему дальнейшее использование расчетных модулей, реализующих различные подходы к моделированию пространственных процессов, разработан прототип программного приложения.

Приложение реализовано с применением библиотеки MapObjects, посредством которой был создан его картографический модуль, а также элементов управления Avis2D

и AvisGrid, которые были использованы в модуле 3D визуализации.

Программа может работать в одном из двух режимов: картографическом и режиме 3D визуализации. В картографическом режиме в окне программы отображается карта Краснодарского края, состоящая из нескольких тематических слоев в проекции Гаусса–Крюгера, включая координатную сетку с размером ячейки 10×10 км (рис. 2), сетку меридианов и параллелей, соответствующую разбивке отображаемой территории на стандартные листы топокарт, слой гидрографии (озера, лиманы, водохранилища, реки, каналы и т.п.), слой населенных пунктов, административные и государственные границы, и некоторые другие слои. Отображение (или отключение отображения) тех или иных слоев зависит от текущего масштаба. Окно картографического модуля программы представлено на рис. 3. При использовании этого режима в верхней части окна можно видеть панель графического интерфейса пользователя, на которой расположены элементы управления.

Поскольку основное назначение карты в данной программе — идентификация положения моделируемых участков рельефа местности, некоторые слои могут быть не вполне завершенными по составу входящих объектов.

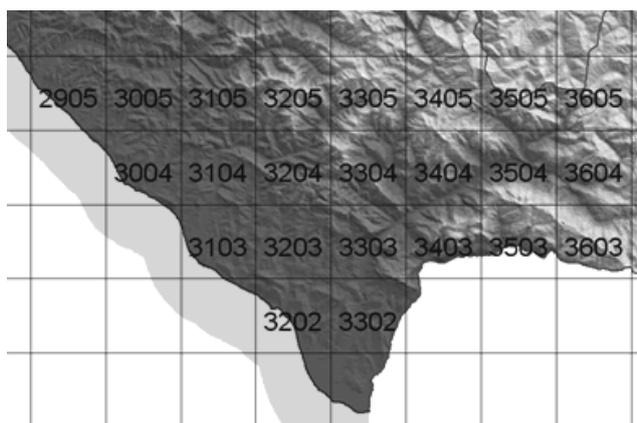


Рис. 2. Пример нумерации десятикилометровых зон моделирования горного ландшафта



Рис. 3. Вид окна картографического модуля, включающий окно локатора (вверху справа)

Однако при необходимости они могут быть дополнены и детализированы посредством внешней корректировки используемых картографических данных без вмешательства в саму программу, что позволяет использовать ее достаточно гибко.

В режиме 3D визуализации выполняется интерактивное отображение трехмерной модели рельефа местности выбранного участка и анализ его поверхности, для чего используется таблица высот точек поверхности рельефа и другие инструменты (рис. 4). Наличие интерактивного взаимодействия позволяет плавно изменять угол зрения, под которым видна поверхность (азимут и угол места камеры), смещать изображение по горизонтали и вертикали, изменять его масштаб. Ниже таблицы высот расположены два поля, обрамленные красными рамками. В них отображаются X и Y координаты (в метрах) в заданной декартовой системе координат положения выбранной точки (рис. 4). Внешний вид отображения поверхности можно менять, выбирая соответственно цветную или черно-белую палитру и задавая дискретный или непрерывный режим отображения.

Продуктивным представляется объединение возможностей универсальных ГИС с оригинальными подходами, допускающими реализацию в виде совместно используемых программных модулей, ориентированных на решение определенного класса задач в области сейсмологии. На территории Краснодарского края находится много объектов ответственного назначения. Например, участок газопровода «Голубой поток» проходит по побережью Черного моря. Поэтому сейсмический мони-

торинг имеет для региона особое значение. Реализованная система взаимосогласованных цифровых карт, созданных на единой географической основе, может быть дополнена включенными в них разломами, трещинами и другими геологическими, гидрологическими и техническими объектами.

При этом формирование пространственно распределенных данных и их предварительную подготовку к дальнейшему анализу удобнее осуществлять средствами универсальной ГИС-системы, а проблемно-ориентированную обработку данных выполнять уже в специализированном приложении. Разработанная цифровая модель может использоваться для анализа данных сейсмического мониторинга Краснодарского края. Специальные аппроксимации, реализованные в ЦМР для моделирования рельефа, позволяют использовать модель не только для визуального анализа, но и для специальных расчетов. При моделировании горных массивов блочной структурой предусмотрены встраиваемые модули для изменения точности цифровой модели с целью уменьшения объема данных (рис. 5).

В результате дальнейших разработок планируется превратить ГИС в общий интерфейс для совместной работы как с имеющимися, так и с новыми программными средствами расчета и оценки характеристик напряженно-деформированного состояния геологических структур с использованием различных подходов [12–14 и др.], интерфейсом взаимодействия с системами сейсмического мониторинга. Это позволит эффективно решать задачи анализа и визуализации данных с пространственной привязкой, а также создания кар-

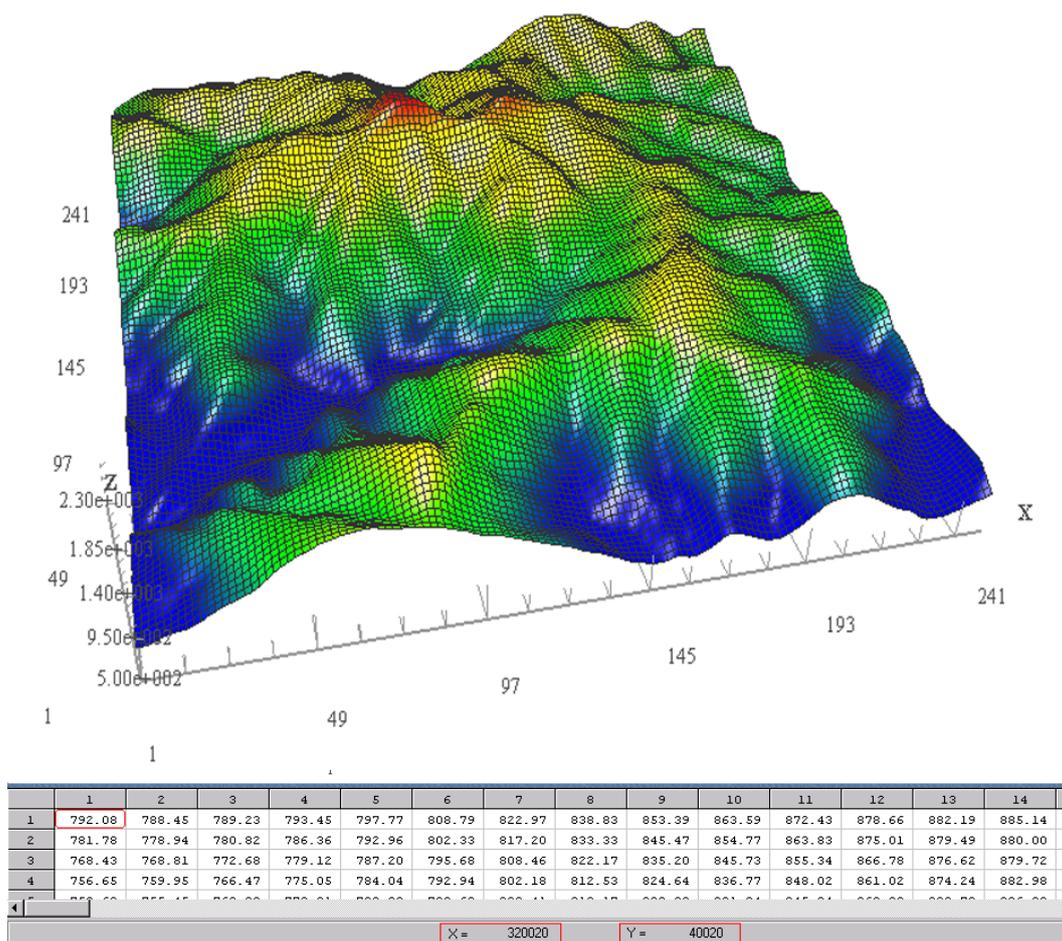


Рис. 4. Фрагмент окна визуализации программы моделирования рельефа участка территории 10×10 км

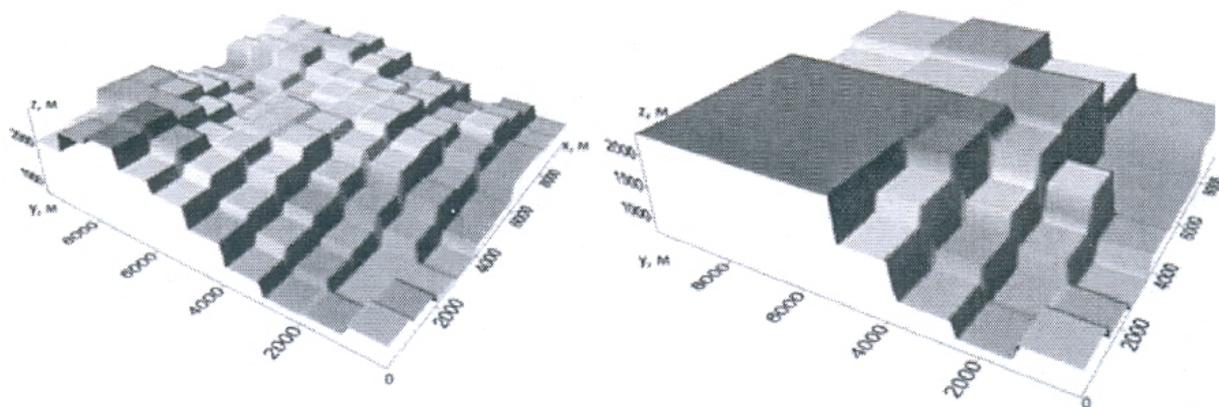


Рис. 5. Различные аппроксимации рельефа сегмента 10×10 км

тографических материалов. На их основе в дальнейшем может проводиться, в том числе, оценка оползневых ситуаций в районах с пересеченной местностью.

Заключение

Для исследования волновых и деформационных процессов в литосферных структурах как сложных деформируемых объектах и сейсмического мониторинга региона предлагается использовать ЦМР территории Краснодарского края.

В качестве инструмента для визуализации, анализа и преобразования моделей рельефа разработан прототип программного приложения, которое может быть использовано не только в качестве средства решения задач, описанных выше, но и как основа для наращивания функциональных возможностей посредством подключения дополнительных модулей для выполнения целого ряда других задач. При помощи встроенных инструментов при работе с атрибутивной и графической информацией можно осуществить интеграцию результатов моделирования и данных о местоположении с картами.

Широкомасштабный сейсмический мониторинг территории Краснодарского края в совокупности с комплексными теоретическими исследованиями и возможностями ГИС по представлению и обработке геопространственных данных позволят расширить возможности изучения ключевых механизмов развития сейсмических явлений.

Литература

1. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 104 с.
2. Иванов С.Н., Иванов К.С. Реологическая модель строения земной коры (модель третьего поколения) // Литосфера. 2018. Т. 18. № 4. С. 500–519.
3. Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Волновые процессы и резонансы в геофизике. М.: ОИФЗ РАН, 2001. 299 с.
4. Трофименко С.В. Отражение блоковой модели земной коры в структуре и динамике инициированной сейсмичности // В сб.: Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле материалы докладов конференции: в 2 томах. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 2012. С. 411–414.

5. Собисевич А.Л. Гравитомагнетизм. Результаты обсерваторских наблюдений // ДАН. 2018. Т. 480, № 5. С. 1–5.
6. Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W. Geographic Information Systems and Science. New York: John Wiley & Sons, 1999. 432 p.
7. Keller R., Baru Ch. Geoinformatics: Cyber-infrastructure for the Solid Earth Sciences. Cambridge: University Press, 2011. 374 p.
8. Кошкарёв А.В. Эффективное управление пространственными метаданными и геосервисами в инфраструктурах пространственных данных // Пространственные данные. 2008. № 1. С. 28–35.
9. Панин А.В., Гельман Р.Н. Опыт применения GPS-технологии для построения крупномасштабных цифровых моделей рельефа // Геодезия и картография. 1997. № 10. С. 22–27.
10. Долгова М.П. Методика обоснования модели рельефа для решения прикладных задач // Информатика и космос. 2010. № 2. С. 39–49.
11. Гладской И.Б., Павлова А.В., Рубцов С.Е. К моделированию распространения природных пожаров с использованием ГИС-технологий // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2019. № 4. С. 13–21.
12. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Рядчиков И.В., Лозовой В.В., Колесников М.Н., Телятников И.С., Грищенко Д.В., Шшишкин А.А., Уафа С.Б., Власова М.С., Смирнова М.В. Развитие новых наукоемких методов мониторинга и прогноза состояния территорий в сейсмоопасных и оползнеопасных зонах // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2013. № 3. С. 8–14.
13. Стогний Г.А., Стогний В.В. Тектонические условия сейсмичности Северо-Западного сегмента и южного склона центрального сегмента Большого Кавказа // В сб.: Глубинное строение, минералогия, современная геодинамика и сейсмичность Европейской платформы и сопредельных регионов. Воронеж: Научная книга, 2016. С. 383–387.
14. Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Лиходеев Д.В. О гравимагнитных возмущениях, предвещающих сейсмические события // ДАН. 2017. Т. 475, № 4. С. 444–447.

References

1. Sadovskiy, M.A., Bolkhovitinov, L.G., Pisarenko, V.F. *Deformirovanie geofizicheskoy sredy i seysmicheskiiy protsess* [Deformation of the geophysical medium and seismic process]. Nauka, Moscow, 1987. (In Russian)
2. Ivanov, S.N., Ivanov, K.S. Reologicheskaya model' stroeniya zemnoy kory (model' tret'ego

- pokoleniya) [Rheological model of the structure of the earth's crust (model of the third generation)]. *Litosfera* [Lithosphere], 2018, vol. 18, no. 4, pp. 500–519. (In Russian)
3. Sobisevich, L.E., Sobisevich, A.L. *Volnovye protsessy i rezonansy v geofizike* [Wave processes and resonances in geophysics]. OIFZ RAN, Moscow, 2001. (In Russian)
 4. Trofimenko, S.V. Otrazhenie blokovoy modeli zemnoy kory v strukture i dinamike initsiirovannoy seysmichnosti [Reflection of the block model of the Earth's crust in the structure and dynamics of initiated seismicity]. In: *Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle materialy dokladov konferentsii* [Tectonophysics and current issues of Earth sciences conference proceedings]. Institut fiziki Zemli im. O.Yu. Shmidta RAN, 2012, pp. 411–414. (In Russian)
 5. Sobisevich, A.L. Gravitomagnetizm. Rezul'taty observatorskikh nablyudeniy [Gravitomagnetism. The results of observational observations]. *Doklady Akademii nauk* [Rep. of the Academy of Sciences], 2018, vol. 480, no. 5, pp. 1–5. (In Russian)
 6. Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W. *Geographic Information Systems and Science*. New York: John Wiley & Sons, 1999.
 7. Keller, R., Baru, Ch. *Geoinformatics: Cyberinfrastructure for the Solid Earth Sciences*. Cambridge: University Press, 2011.
 8. Koshkarev, A.V. Effektivnoe upravlenie prostranstvennymi metadannymi i geoservisami v infrastrukturakh prostranstvennykh dannykh [Effective spatial metadata and geo services management in spatial data infrastructures]. *Prostranstvennyye dannye* [Spatial data], 2008, no. 1, pp. 28–35. (In Russian)
 9. Panin, A.V., Gel'man, R.N. Opyt primeniya GPS-tekhnologii dlya postroeniya krupnomasshtabnykh tsifrovyykh modeley rel'efa [The experience of using GPS technology to build large-scale digital elevation models]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and Cartography], 1997, no. 10, pp. 22–27. (In Russian)
 10. Dolgova, M.P. Metodika obosnovaniya modeli rel'efa dlya resheniya prikladnykh zadach [Methodology for substantiating a relief model for solving applied problems]. *Informatsiya i kosmos* [Information and Space], 2010, no. 2, pp. 39–49. (In Russian)
 11. Gladskoy, I.B., Pavlova, A.V., Rubtsov, S.E. K modelirovaniyu rasprostraneniya prirodnykh pozharov s ispol'zovaniem GIS-tekhnologii [On modeling the spread of natural fires using GIS technologies]. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of the Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2019, no. 4, pp. 13–21. (In Russian)
 12. Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Ryadchikov, I.V., Lozovoy, V.V., Kolesnikov, M.N., Telyatnikov, I.S., Grishchenko, D.V., Shishkin, A.A., Uafa, S.B., Vlasova, M.S., Smirnova, M.V. Razvitie novykh naukoemkikh metodov monitoringa i prognoza sostoyaniya territoriy v seysmoopasnykh i opolzneopasnykh zonakh [Development of new high-tech methods for monitoring and forecasting the state of territories in earthquake-prone and landslide-hazardous zones]. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of the Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2013, no. 3, pp. 8–14. (In Russian)
 13. Stogniy, G.A., Stogniy, V.V. Tektonicheskie usloviya seysmichnosti Severo-Zapadnogo segmenta i yuzhnogo sklona tsentral'nogo segmenta Bol'shogo Kavkaza [Tectonic seismic conditions of the North-Western segment and the southern slope of the central segment of the Greater Caucasus]. In: *Glubinnoe stroenie, mineralogiya, sovremennaya geodinamika i seysmichnost' Evropeyskoy platformy i sopredel'nykh regionov* [Deep structure, mineralogy, modern geodynamics and seismicity of the European Platform and adjacent regions]. Nauchnaya kniga, Voronezh, 2016, pp. 383–387. (In Russian)
 14. Sobisevich, A.L., Sobisevich, L.E., Kanonidi, K.Kh., Likhodeev, D.V. O gravimagnitnykh vozmushcheniyakh, predvaryayushchikh seysmicheskie sobytiya [On gravimagnetic disturbances preceding seismic events]. *Doklady Akademii nauk* [Rep. of the Academy of Sciences], 2017, vol. 475, no. 4, pp. 444–447. (In Russian)