

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 2 / 2023, Vol. 15, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/05NZVN223.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Тодорова, А. Й. Корреляционный анализ некоторых факторов, влияющих на развитие карста в Нижегородской области, с использованием геоинформационных технологий / А. Й. Тодорова, М. А. Дракин, А. А. Лаврусевич // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/05NZVN223.pdf>

For citation:

Todorova A.Y., Drakin M.A., Lavrusevich A.A. Correlation analysis of some factors influencing the development of karst in the nizhny novgorod region, using geoinformation technologies. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(2): 05NZVN223. Available at: <https://esj.today/PDF/05NZVN223.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

Тодорова Ася Йорданова

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия

Аспирант

E-mail: assia.genova@gmail.com

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1061781

Дракин Михаил Александрович

ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»,
Долгопрудный, Россия

Инженер

E-mail: drakin.ma@mipt.ru

Лаврусевич Андрей Александрович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия

Профессор, заведующий кафедрой «Инженерных изысканий и геоэкологии»

Доктор геолого-минералогических наук

E-mail: LavrusevichAA@mgsu.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=363994

**Корреляционный анализ некоторых факторов,
влияющих на развитие карста в Нижегородской области,
с использованием геоинформационных технологий**

Аннотация. Выявление карстоопасных участков местности имеет большую важность для народного хозяйства. Непосредственное исследование местности на предмет степени опасности карстовых явлений является трудоемким и ресурсоемким. Более эффективным с точки зрения затрат, особенно если речь идет о предварительной оценке, является определение степени карстоопасности как характеристики участка местности на карте по различным косвенным признакам, которые, однако, имеют статистическую взаимосвязь (корреляцию) со степенью карстоопасности и могут быть определены по данным, находящимся в открытом доступе. В данной статье проводится статистический анализ некоторых факторов, влияющих на степень карстоопасности, на основе данных и программного обеспечения, находящихся в открытом доступе, на примере Нижегородской области. Авторами рассмотрен способ определения статистической взаимосвязи между степенью карстоопасности, мерой неровности рельефа, расстоянием до водных объектов как количественными признаками, а также между степенью карстоопасности и геологическим строением местности как качественными признаками. Вычисления проводятся с помощью геоинформационной системы с открытым

исходным кодом QGIS. В статье перечислены источники данных и представлено полное описание технологической последовательности действий, позволяющей собрать в одну базу данных карты, содержащие перечисленные атрибуты местности, и провести анализ статистической взаимосвязи как количественных, так и качественных атрибутов. На примере конкретных данных авторами продемонстрирована возможность определения степени карстоопасности на карте по данным, находящимся в открытом доступе, с минимальными затратами времени и без необходимости использования коммерческого программного обеспечения.

Ключевые слова: карст; геоинформационная система; корреляция; геологическая карта; статистический анализ; карстоопасность; модель рельефа

Введение

Значительные площади на территории России занимают карстоопасные районы. Карстовые явления (в особенности карстовые провалы) представляют значительную угрозу как для жизни людей, так и для народного хозяйства. Одним из факторов такой угрозы является непредсказуемый характер новых проявлений карста, сложность их своевременного обнаружения и мониторинга развития. В России противокарстовым мероприятиям исторически уделяется большое внимание [1; 2]. С другой стороны, водные объекты, ассоциированные с карстом, являются важной составляющей водных ресурсов [3]; кроме того, карстовые области ассоциируются с месторождениями полезных ископаемых [4]. Непосредственное исследование местности на предмет степени опасности карстовых явлений является трудоемким и ресурсоемким. В данной работе рассматривается статистическая взаимосвязь между степенью карстоопасности и некоторыми факторами, информация о которых может быть получена из данных, находящихся в открытом доступе, а также с использованием бесплатного программного обеспечения с открытым исходным кодом, что может позволить снизить расходы как минимум на предварительную оценку местности. На примере Нижегородской области, на территории которой проходят активные процессы карстообразования [5], демонстрируется исследование статистической зависимости между развитием карстовых процессов и геологическим строением местности (по данным государственной геологической карты РФ), степенью неровности рельефа (по данным рельефа, полученного со спутника Terra (аппаратура ASTER) NASA — Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США).

Существующие методические подходы

Существующие методические подходы имеют различную эффективность и степень достоверности. Если говорить об эффективности, то этот показатель напрямую зависит от затраченных ресурсов. Общий массив информации, доступной по каждому конкретному району местности, сильно зависит от географического расположения района. В России количество данных, уже доступных, а также вновь получаемых из различных источников, касающихся изучаемой сферы, заметно меньше, чем в западных странах, поэтому затраты на полный сбор необходимых для принятия управленческих решений данных могут быть выше. Кроме того, некоторые методы получения данных, вполне эффективные на современном уровне развития техники, могут оказаться труднодоступными. Так, на исследуемой территории (Нижегородской области) с 31 октября 2022 года запуск БПЛА (беспилотных летательных аппаратов) могут осуществлять только государственные организации, либо предприятия и

организации по договору с органами госвласти¹, поэтому организация обследования местности с использованием БПЛА теперь требует, как минимум, больших временных затрат (при том, что организация аэрофотосъемки и ранее требовала значительных организационных затрат). Также в настоящее время практически отсутствует доступ к космической съемке высокого разрешения. Таким образом, для рассматриваемой территории значительно падает эффективность имеющих высокую степень достоверности методов исследования, активно применяющихся в других странах.

В настоящее время активно применяется интегральный подход, сочетающих в себе использование различных доступных источников и методов оценки [6]. В условиях, когда из доступных на современном уровне развития науки и техники методов и источников данных доступно некоторое подмножество, зависящее от географического района и текущей обстановки, в каждом конкретном случае набор исходных данных и доступных методов может сильно отличаться, напрямую сравнивать применяющиеся для решения даже сходных задач, но на различных территориях и в различное время подходы представляется не совсем корректным, эффективность и степень достоверности в каждом случае могут отличаться. Можно сказать, что в рамках интегрального подхода данные из всех доступных в рамках конкретного исследуемого района и временного периода источников формируют общее информационное поле, в рамках которого задачей исследования является нахождение закономерностей и взаимосвязей, позволяющих выявить факторы, влияющие на целевой показатель (степень карстоопасности), а также минимизировать затраты и максимизировать эффективность получения дополнительных данных для увеличения степени достоверности получаемых результатов. Использование ГИС-технологий (технологий геоинформационных систем) для исследования потенциально опасных процессов описано, например, в работах [7–9].

Определение зависимости между наборами данных

Оценка взаимосвязи для количественных признаков (в контексте данной работы — количественным выражением степени карстоопасности по шкале от 0 до 4, а также расстоянием до водных объектов, выраженных в метрах, и степенью неровности рельефа, выраженным в виде локального перепада высот в метрах), заданных в виде геопривязанных растров, производится при помощи коэффициента корреляции. Коэффициент корреляции между растрами вычисляется по формуле:

$$r_{XY} = \frac{\sum(X-\bar{X})(Y-\bar{Y})}{\sqrt{\sum(X-\bar{X})^2 \sum(Y-\bar{Y})^2}},$$

где X , Y — значения интенсивности пикселей двух наборов данных; \bar{X} и \bar{Y} — средние значения по всему растру для двух наборов данных, суммирование выполняется по всем пикселям двух растров, относящимся к одним и тем же участкам рельефа.

Статистический анализ качественных признаков проводится по критерию согласия Пирсона χ^2 : в данном случае используются векторные карты, состоящие из покрытия местности полигонами, и пересечение карт, состоящие из таких полигонов, что каждый из них обладает только одним признаком из набора X и Y (в контексте данного исследования — каждый полигон состоит из одного типа горных пород и имеет один класс карстоопасности). Тогда критерий « χ^2 » вычисляется по формуле:

$$\chi_n^2 = \sum \frac{(n_i - \tilde{n}_i)^2}{\tilde{n}_i},$$

¹ В Нижегородской области запретили запуск беспилотников. РИА Новости. URL: <https://ria.ru/20221031/bespilotniki-1828219320.html> (дата обращения 01.03.2023).

где i — группа полигонов, обладающих одним и тем же сочетанием признаков X (уровня карстоопасности) и Y (геологической породы), n_i — фактическое число элементов с данным набором признаков в пределах группы полигонов i , \tilde{n}_i — теоретическое число элементов с данным набором признаков в пределах полигона i , в предположении, что признаки взаимонезависимы. В контексте сравнения геологической карты и карты карстоопасности в качестве элемента целесообразно принять участок поверхности, соответствующий разрешению карты для данного масштаба. Поскольку обе исходные карты имеют масштаб 1:1000000, то разрешение карты можно принять соответствующим 0,2 мм в масштабе карты, т. е. 200 м на местности. Соответственно элементом для расчета χ^2 можно принять участок местности размером 200x200 м, т. е. 40000 м². Тогда n_i — фактическая площадь группы полигонов, выраженная в этих единицах ($n_i = S_i/40000$), а \tilde{n}_i — средняя доля площади группы полигонов, которую должно занимать сочетание данного типа горной породы и степени карстоопасности при их равномерном независимом распределении по территории всей области:

$$\tilde{n}_i = \frac{(S_{Xi}/40000) \cdot (S_{Yi}/40000)}{(S/40000)},$$

где S_{Xi} — общая площадь территории области, имеющая признак (степень карстоопасности) X_i ; S_{Yi} — общая площадь территории области, имеющая признак (геологическую породу) Y_i ; S — общая площадь Нижегородской области.

Если полученное значение χ_n^2 превышает табличное значение $\chi_{v,\alpha}^2$ для заданной доверительной вероятности α и числа степеней свободы:

$$v = (m_X - 1)(m_Y - 1),$$

где m_X и m_Y — общее число вариантов значений признаков X и Y соответственно, то можно говорить о наличии статистической взаимосвязи между признаками в рамках района работ.

Исходные данные

В состав исходных данных, используемых для выполнения исследования, входят:

- карта развития карстовых процессов территории Нижегородской области (приложение к документу: Рекомендации по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области², рисунок 1);
- геологическая карта Нижегородской области («ГИС-Атлас Недр России»³, рисунок 2);
- карта рек Нижегородской области, входящая в комплект поставки геологической карты ВСЕГЕИ (Всероссийского научно-исследовательского геологического института имени А.П. Карпинского)³ (рис. 3);
- рельеф Aster GDEM (Global Digital Elevation Map, разрешение 30 м, NASA EarthData⁴, рисунок 4).

² Рекомендации по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области. Департамент градостроительного развития территории Нижегородской области, 2012 г.

³ ГИС-Атлас Недр России. ВСЕГЕИ. URL: <http://atlaspacket.vsegei.ru/> (дата обращения 01.03.2023).

⁴ NASA EarthData. URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search/> (дата обращения 24.06.2022).

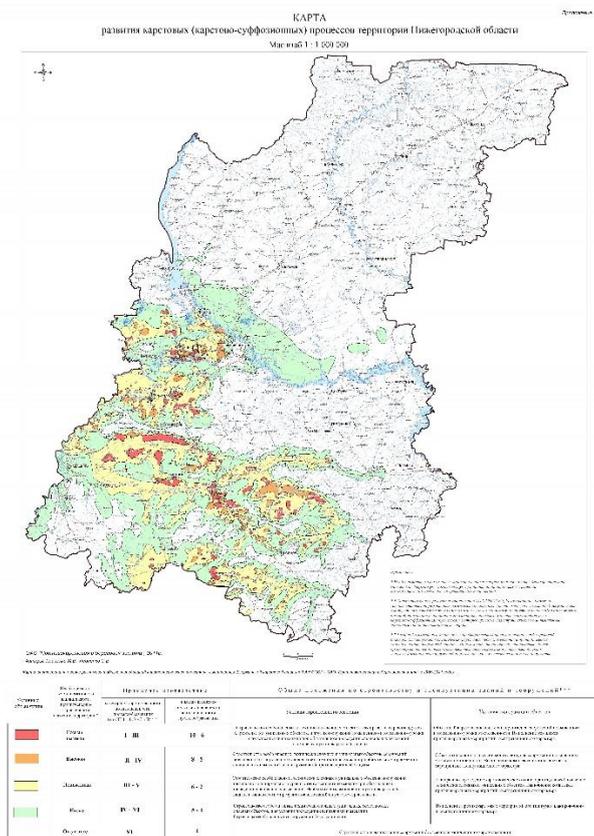


Рисунок 1. Карта развития карстовых процессов территории Нижегородской области — исходный вид²

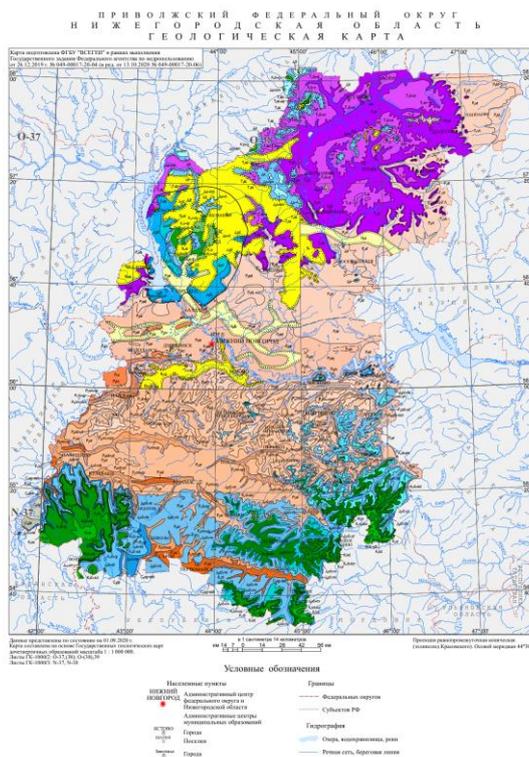
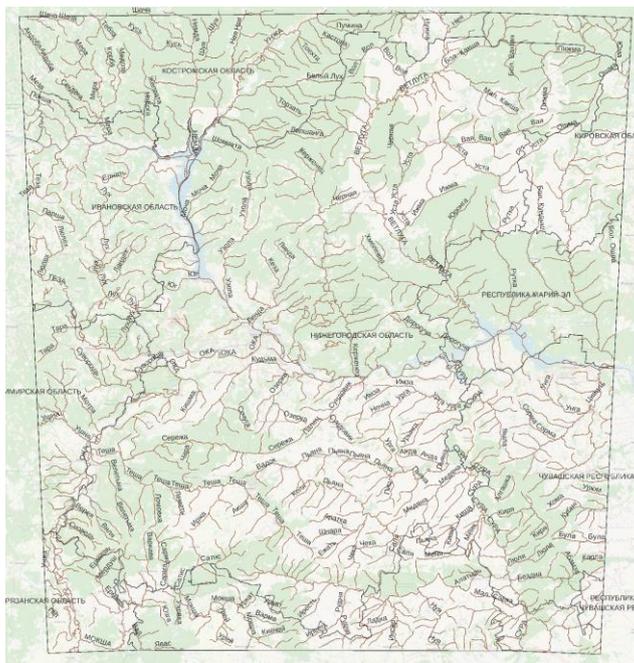


Рисунок 2. Геологическая карта Нижегородской области³



*Рисунок 3. Карта рек Нижегородской области
(составлено авторами на основе данных ГИС-Атласа «Недра России»³)*

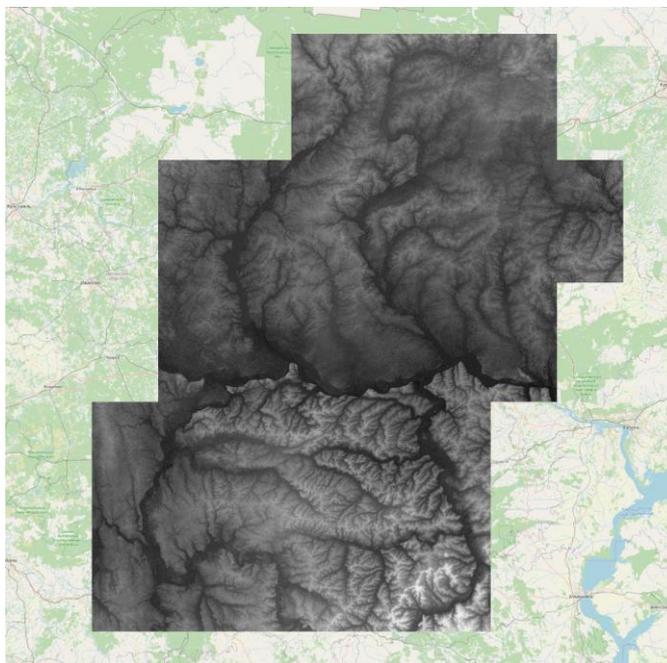


Рисунок 4. Рельеф Aster GDEM (составлено авторами на основе данных NASA EarthData⁴)

Программа обработки данных

1. Выбор и получение исходных данных:
 - загрузка растровых и векторных данных из Интернет.
2. Загрузка данных в ГИС и преобразование в пригодный для обработки вид:
 - выполнение геопривязки данных;
 - приведение к общей проекции;

- векторизация данных, непригодных к обработке в исходном виде.
3. Выполнение анализа зависимости карстоопасности территории от ее характеристик:
 - вычисление коэффициента корреляции между степенью карстоопасности и характеристиками, представимыми в числовом виде;
 - вычисление значения χ^2 для качественных характеристик;
 4. Составление выводов о наличии возможных взаимосвязей.

Используемое программное обеспечение

Обработка данных выполняется в геоинформационной системе с открытым исходным кодом QGIS⁵ версии 3, которая является одной из наиболее распространенных бесплатных ГИС [9].

Подготовка данных

В первую очередь необходима загрузка в ГИС в виде, пригодном для автоматизированной обработки, карты развития карстовых процессов Нижегородской области, которая изначально представляет из себя подготовленный для печати растровый файл. Была выполнена обрезка и геопривязка растровой карты (рис. 5), затем ее векторизация (рис. 6).

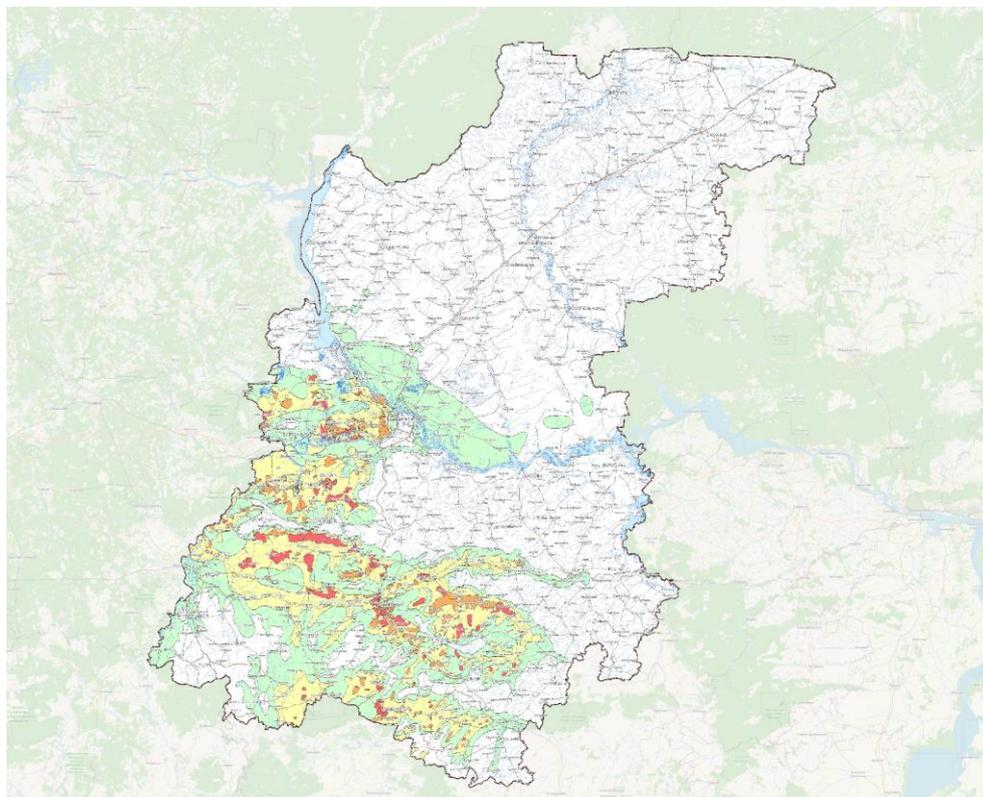
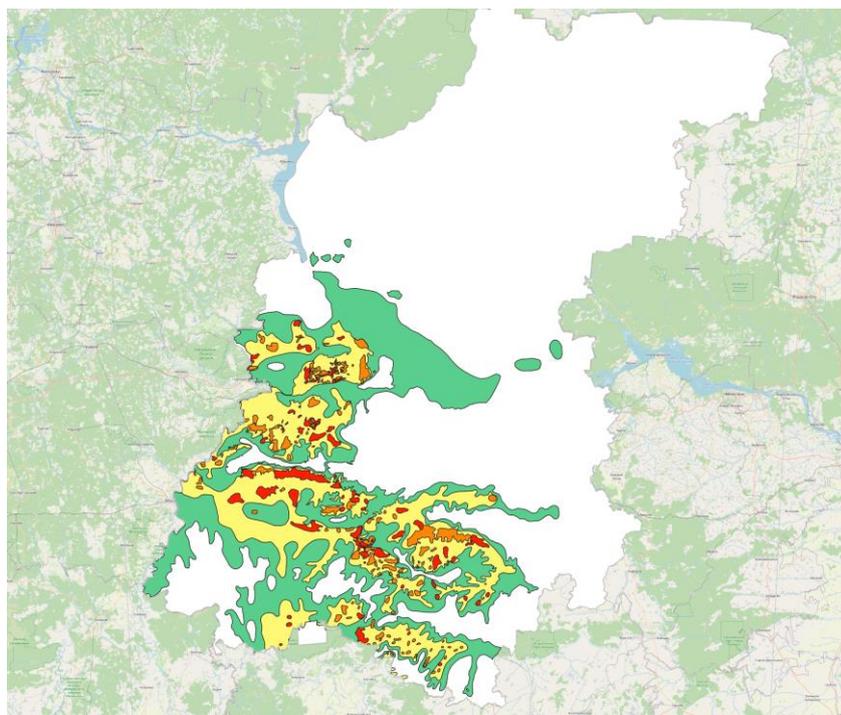


Рисунок 5. Геопривязка растровой карты карстоопасности
(составлено авторами на основе данных карты развития карстовых процессов²)

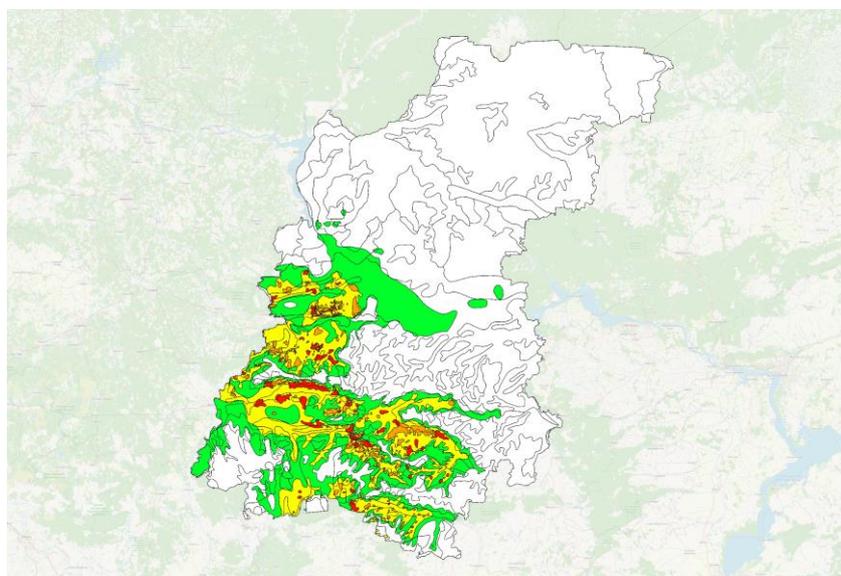
⁵ Официальный сайт QGIS. URL: <https://qgis.org/ru/site/> (дата обращения 24.06.2022).



*Рисунок 6. Векторизованная карта карстоопасности
(составлено авторами на основе данных карты развития карстовых процессов²)*

Исследование зависимости степени карстоопасности от геологического строения местности

Карта карстоопасности и геологическая карта сопоставлялись как наборы качественных признаков. Была составлена векторная карта, представляющая собой пересечение полигонов, образующих карту карстоопасности и геологическую карту (рис. 7), затем средствами QGIS выполнен расчет критерия согласия Пирсона для площадей полигонов.



*Рисунок 7. Пересечение карты карстоопасности и геологической
карты (составлено авторами на основе данных карты развития карстовых
процессов² и ГИС-Атласа «Недра России»³)*

Значение статистики χ_n^2 составило $1,016 \cdot 10^6$ для общего числа условных единиц площади, равного 1921010. Для доверительной вероятности $\alpha = 5\%$ и числа степеней свободы:

$$\nu = (25 - 1) \cdot (5 - 1) = 96,$$

где 25 — число типов геологической карты и 5 — число классов карстоопасности, пороговое значение $\chi_{\nu, \alpha}^2$ составляет 119,8709, т. е. $\chi_n^2 \gg \chi_{\nu, \alpha}^2$. Заметим, что в данном случае не была использована существующая по определению карста зависимость опасности карстовых явлений от конкретного характера пород, формирующих местность, а продемонстрирован численный расчет, абстрагированный от конкретного физического смысла данных.

Исследование зависимости карстоопасности от расстояния до водных объектов

Особенности развития речной сети в районах распространения карста рассмотрены в работе [10].

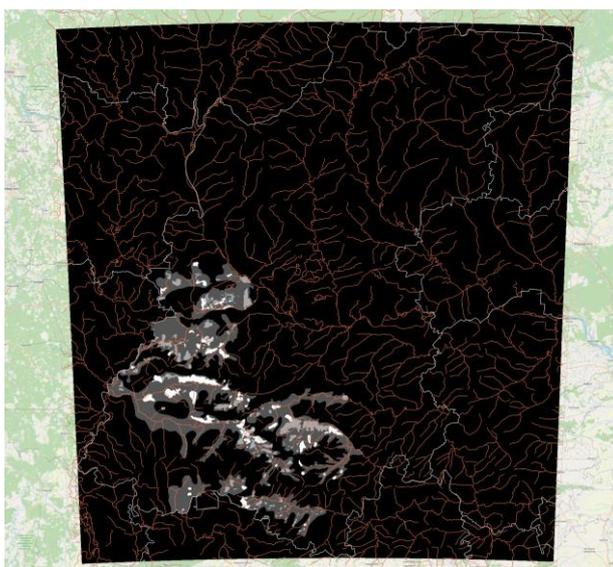


Рисунок 8. Растеризованная карта карстоопасности с наложенной картой рек (составлено авторами на основе данных карты развития карстовых процессов² и ГИС-Атласа «Недра России»³)

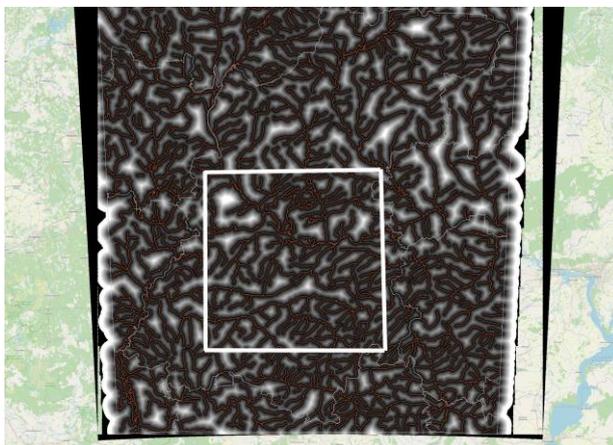


Рисунок 9. Растеризованная карта расстояния до водных объектов (черное = 0 км, белое = 14 км) с наложенными границами, в пределах которых рассчитывается коэффициент корреляции (составлено авторами на основе данных ГИС-Атласа «Недра России»³)

В настоящей работе расчет зависимости карстоопасности от расстояния до водных объектов был выполнен в виде расчета коэффициента корреляции между количественными характеристиками в растровом виде. Карта карстоопасности была преобразована в одноканальный растр с размером пиксела на местности 200 м и со значением интенсивности, соответствующим классу опасности от 0 до 4 (рис. 8). При помощи операции создания буферной зоны карта рек была преобразована в растровую карту расстояния до воды (интервал значений от 0 до 14 км с шагом 200 м, размер пиксела также 200 м, рисунок 9). Поскольку операция расчета коэффициента корреляции в QGIS не учитывает области слоев без данных, в исследовательских целях для простоты была выбрана прямоугольная область, полностью попадающая в границы области в южной части (в карстоопасной области), показанная на рисунке 9.

В результате выполнения расчета было получено значение коэффициента корреляции, равное -0,0764.

Доверительный интервал для размера выборки 350440 и уровня доверия 0,99 составляет $[-0,081; -0,072]$, то есть можно говорить о наличии взаимосвязи (чем меньше расстояние до воды, тем выше карстоопасность).

Исследование зависимости карстоопасности от степени неровности рельефа

Для расчета коэффициента корреляции между степенью карстоопасности и степенью неровности рельефа, рельеф Aster GDEM, имеющий разрешение 30 м, был переинтерполирован на сетку с шагом 200 м, после чего был применен инструмент QGIS «Ruggedness index», вычисляющий для каждого пиксела растра среднюю разность значения высоты в этом пикселе и в 8 окружающих. Результат расчета с наложенной прямоугольной областью для расчета корреляции показан на рисунке 10.

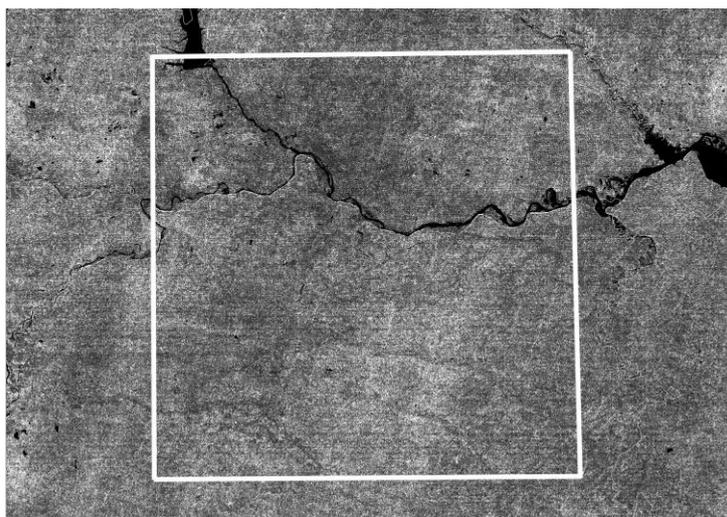


Рисунок 10. Карта степени неровности рельефа, построенная на основе данных Aster GDEM, с наложенной областью корреляции (составлено авторами на основе данных NASA EarthData⁴)

В результате выполнения расчета было получено значение коэффициента корреляции, равное 0,0756.

Доверительный интервал для размера выборки 350440 и уровня доверия 0,99 составляет $[0,071; 0,080]$, то есть можно говорить о наличии взаимосвязи (чем выше степень неровности рельефа, тем выше карстоопасность).

Заключение

Продемонстрирована технология расчета зависимости степени карстоопасности от различных факторов, представленных в виде векторных и растровых карт с использованием системы QGIS. Вычислена в числовом виде статистическая значимая взаимосвязь между степенью карстоопасности, геологическим строением местности, а также степенью неровности рельефа и расстоянием до водных объектов. Выполненная работа позволяет предложить комплексное использование различных доступных источников картографических данных и данных ДЗЗ для практического применения — оценки карстоопасности конкретных участков местности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хоменко Виктор Петрович Противокарстовая и противосуффозионная защита в России: история и современность // Вестник МГСУ. 2018. № 4(115). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/protivokarstovaya-i-protivosuffozionnaya-zaschita-v-rossii-istoriya-i-sovremennost> (дата обращения: 01.03.2023).
2. Дублянская, Г.Н. Картографирование, районирование и инженерно-геологическая оценка закарстованных территорий / Г.Н. Дублянская, В.Н. Дублянский. — Новосибирск: Изд-во РАН, 1992. — 143 с.
3. Ford, D. Karst hydrogeology and geomorphology / D. Ford, P. Williams. — Wiley, 2007. — 578 p.
4. Кутырев Э.И., Михайлов Б.М., Ляхницкий Ю.С. Карстовые месторождения. — Л.: Недра, 1989. — 311 с.
5. Яшнова, Т.В. Проявления карста на территории Нижегородской области / Т.В. Яшнова // Молодой ученый. — 2014. — № 21(80). — С. 62–65. — URL: <https://moluch.ru/archive/80/14327/> (дата обращения: 01.03.2023).
6. Щербаков С.В. Методика изучения взаимосвязей между карстовыми формами и природными условиями территорий // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 5; URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7232> (дата обращения: 01.03.2023).
7. ГИС-технологии в изучении опасных геологических процессов / А.И. Смирнов, В.Н. Дурнаева, Р.Ф. Абдрахманов, А.О. Полева // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов. Академия наук Республики Башкортостан. — 2017. — № 24. — С. 70–76.
8. Кузнецов М.В. Использование географических информационных систем в целях прогнозирования карстовых процессов (на примере Малого Хингана) // Достижения вузовской науки. 2016. № 21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-geograficheskikh-informatsionnyh-sistem-v-tselyah-prognozirovaniya-karstovyh-protsessov-na-primere-malogo-hingana> (дата обращения: 01.03.2023).
9. Липина Л.Н., Усиков В.И. Использование геоинформационных технологий для оценки и прогноза состояния окружающей среды // ГИАБ. 2018. №8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-geoinformatsionnyh-tehnologiy-dlya-otsenki-i-prognoza-sostoyaniya-okruzhayuschey-sredy> (дата обращения: 01.03.2023).
10. Антроповский В.И., Петров О.А. Морфология и русловые процессы рек в районах распространения карста // Известия РГПУ имени А.И. Герцена. 2002. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/morfologiya-i-ruslovyie-protsessy-rek-v-rayonah-rasprostraneniya-karsta> (дата обращения: 01.03.2023).

Todorova Asya Yordanova

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia
E-mail: assia.genova@gmail.com
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1061781

Drakin Mikhail Aleksandrovich

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia
E-mail: drakin.ma@mipt.ru

Lavrusevich Andrey Aleksandrovich

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia
E-mail: LavrusevichAA@mgsu.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=363994

Correlation analysis of some factors influencing the development of karst in the nizhny novgorod region, using geoinformation technologies

Abstract. Identification of karst hazardous areas is of great importance for the national economy. Direct study of the terrain considering the degree of danger of karst phenomena is laborious and resource-intensive. More cost-effective, especially when it comes to a preliminary assessment, is determining the degree of karst hazard as a characteristic of a parcel on map according to various indirect features, which, however, have a statistical relationship (correlation) with the degree of karst hazard and can be determined from data being in open access. This article provides description of statistical analysis of some factors that affect the degree of karst hazard, based on data and software that are in the public domain, using the Nizhny Novgorod region as example test area. The authors have considered a method for determining statistical relationship between the degree of karst hazard, the measure of unevenness of the relief, the distance to water bodies — as quantitative features, as well as relationship between the degree of karst hazard and the geological structure of the area as qualitative features. Calculations are carried out using the QGIS open-source geographic information system. The article lists data sources and provides complete description of the technological sequence of actions that allows collecting maps containing the forementioned terrain attributes into one database and analyzing the statistical relationship of both quantitative and qualitative attributes. Using specific data as an example, the authors demonstrated the possibility of determining the degree of karst hazard on a map using publicly available data with minimal time and without the need to use commercial software.

Keywords: karst; geographic information system; correlation; geologic map; statistical analysis; karst danger; terrain model