



# АНАЛИЗ ОПЫТА ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КАРСТОВО- СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

П.Ю. ОРЛОВ<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии  
и картографии, Москва, Россия  
✉ knightrider3e0@gmail.com

**ЦИТИРОВАНИЕ** Орлов П.Ю. Анализ опыта геоинформационного моделирования карстово-суффозионных процессов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2022. Т. 66. № 5. С. 14-27. DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-5-14-27

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** Web-ГИС, карст, карстово-суффозионные процессы, карстово-суффозионные воронки, ArcGIS API, CesiumJS

## АННОТАЦИЯ

В данном исследовании представлены сведения о современных подходах к идентификации карстовых образований на земной поверхности – технологиях дистанционного зондирования и глубокого машинного обучения. Рассмотрен опыт отечественных и зарубежных организаций в части геоинформационного моделирования карстовых явлений. Выявлено, что попытки сочетания многообразия уже имеющегося программного обеспечения для решения задач в области исследования карста не приносят должного результата, а классические цифровые тематические карты и атласы не подходят для решения задач геологического моделирования и анализа подземных объектов и структур.

Продемонстрированы современные web-ГИС-решения на базе ArcGIS API for JavaScript и отмечены их функциональные недостатки. По итогам работы сделан вывод о необходимости использовать открытое средство разработки ГИС – графическую библиотеку Cesium, поскольку с ее помощью можно создать полнофункциональную ГИС для геоинформационного моделирования геологических процессов, создания объемных трехмерных динамических моделей, описывающих изменение геометрических характеристик провалов и разломов с течением времени, а также вести учет электронного каталога геологических скважин с их внесением в ГИС.

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Классическое определение карста принадлежит геологу, доктору геолого-минералогических наук, основателю научной школы в области карстоведения Георгию Алексеевичу Максимовичу: «Карст – это процесс химического и отчасти механического воздействия подземных и поверхностных внерусловых вод на растворимые проницаемые горные породы (карбонаты, гипс и ангидрит, соли, соду и др.). В результате возникают поверхностные и подземные скульптурные, а при выпадении из раствора, обрушении – и аккумулятивные формы»<sup>1</sup>.

При строительстве магистральных наземных трасс (МНТ), продуктопроводов, воздушных линий электропередачи необходимо учитывать наличие карста в зоне строительства. Рост плотности застройки и населения многих территорий, прилегающих к МНТ, на фоне общемировой тенденции к ускорению урбанизационных процессов, ведет к дальнейшему увеличению антропогенного воздействия на геологическую среду: добыча подземных вод, формирующая депрессионные воронки в водоносных горизонтах; изъятие пород, в том числе известняковых, создающее условия для активизации карстовых процессов; вымывание и растворение пород на фоне экстремальных погодных явлений стремительно изменяющегося климата (стресс пород от смены сильной жары на холод с обильным выпадением осадков)<sup>2</sup>. Все это объясняет рост образования карстовых провалов на территории Европейской части России, а также на Урале.

Существующие нормативные документы, регламентирующие проектирование и непосредственное проведение строительных работ с учетом возможного возникновения карстовых процессов, предписывают использование вероятностно-статистических подходов

1 Максимович Г.А. Основы карстоведения. Т. 1. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь: Пермское книжное издательство, 1963. 445 с.

2 Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П., Максимович Н.Г. Карст и пещеры Пермской области. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 1992. 200 с.

с выполнением соответствующего районирования территории по частоте возникновения карста. При этом отсутствуют критерии оценки опасности воздействия подобных явлений на застройку, и упускаются из виду подходы, базирующиеся на аппарате механики сплошных и дискретных сред [1].

Целью статьи является анализ опыта отечественных и зарубежных научных коллективов по геоинформационному моделированию карстово-суффозионных процессов, разработке соответствующих решений и использовании уже существующих программных продуктов.

## 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### 2.1 Обзор технологий для нахождения карстовых образований

Ранее для обнаружения карстово-суффозионных воронок (КСВ) и провалов использовался визуальный осмотр, который является мероприятием субъективного характера, требующим больших временных затрат и человеческих ресурсов. Для поиска и картографирования карстовых ландшафтов применялись топографические карты и аэрофотоснимки, а для проведения их морфометрических исследований требовались цифровые модели рельефа (ЦМР), например, данные ЦМР ASTER, SRTM, и данные панхроматической съемки высокого пространственного разрешения (2,5 метра) космического аппарата (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) ALOS (до 2011 года), используемые для формирования ЦМР [2].

Однако ЦМР имеют довольно низкие уровни пространственного разрешения и геометрической точности, особенно на территории, покрытые плотной лесной растительностью. Напротив, использование средств воздушного лазерного сканирования (лидаров) позволяет получить данные о подстилающей поверхности даже в густых лесах; данные лидарной съемки обладают высоким разрешением, а значит, обеспечивают проведение более точного анализа особенностей рельефа и геоморфологии местности. Так, в работе [3] представлена вероятностная оценка для идентификации карстовых провалов и определения их характеристик по данным лазерного сканирования. Для вычисления вероятности обнаружения воронки применялась линейная логистическая регрессия. Широко используемые геоморфометрические индексы были получены с использованием открытой настольной ГИС SAGA.

Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК) имеет опыт в оказании содействия при исследовании карстовых форм бассейна реки Салмыш в Оренбургской

области<sup>3</sup>. Для этого использовались геологические карты масштаба 1 : 200 000 всех районов поверхностного залегания карста, аэрофотоснимки масштаба 1 : 25 000 и крупнее, космоснимки с пространственным разрешением 15–30 метров и менее, а также топографические планы, выполненные по результатам полевых работ. Отмечается, что черно-белые снимки хорошего качества позволяют уверенно идентифицировать даже мелкие проявления карста с диаметром от нескольких метров, представляющиеся в виде темных пятен округлой или вытянутой формы, а также полос на более светлом фоне русла. Кроме того, отмечены преимущества использования результатов аэро- и космической съемки, позволяющих выявлять распространение и плотность КСВ на больших площадях, их динамику и степень воздействия на сельское и городское хозяйство<sup>3</sup>.

При исследовании проявлений карста также применяются данные радиолокационной съемки. Так, в работе [4] использовались данные высокого пространственного разрешения (3 метра) радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) КА ДЗЗ Radarsat-2 и данные среднего пространственного разрешения (5×20 метров) РСА КА ДЗЗ Sentinel-1 для измерения оседания пород над затопленным калийным рудником близ г. Березники. Применялась методика дифференциальной интерферометрии (DInSAR) с целью измерения степени и скорости оседания. Данные измерений обрабатывались с помощью программного обеспечения (ПО) Multidirectional Small Baseline Subset (MSBAS) для получения одномерных и двумерных временных рядов деформации грунта, а также скорости линейной деформации. Авторы предполагают, что постоянное растворение минерала карналлита в здешних породах будет способствовать проседанию и возникновению новых провалов в будущем.

К настоящему моменту для нахождения КСВ уже начали применяться технологии глубокого обучения. Так, специалисты Китайской академии наук воспользовались нейронной сетью DeepLab v3+ от компании Google для поиска объектов карста в округе Либо, провинция Гуйчжоу [5]. В качестве исходных данных были взяты космические снимки КА ДЗЗ Landsat-8 (красный, зеленый и синий каналы) и ЦМР ASTER. Для повышения точности и достоверности результата потребовалось доработать модуль импорта данных нейронной сети, так как он по умолчанию не обрабатывает более трех входных каналов. Наиболее достоверный результат был достигнут при использовании набора данных (в следующем порядке): красный канал, зеленый канал, синий канал, ЦМР. Коэффициент Жаккара при этом составил 95,5 %. По мнению авторов, с помощью разработанного ими метода можно автоматически находить карстовые воронки в пределах ландшафта.

<sup>3</sup> Сладкопевцев С.А., Щерба В.А., Катков М.Б. Дистанционные методы изучения карста Оренбургского Приуралья // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2006. № 3. С. 60–69.

## 2.2 Применение геоинформационных технологий для исследования карстово-суффозионных процессов в регионах России и за рубежом

На данный момент для решения задач в геологии и геоэкологии активно применяются настольные ГИС, такие как коммерческие ArcGIS и MapInfo. В меньшей степени используется свободно распространяемая QGIS и другие продукты. Для импорта исходных данных, обработки, анализа и представления ЦМР и цифровых моделей поверхностей (ЦМП) часто используется специализированное коммерческое ПО, например программный инструмент Surfer и пакет Voxler от компании Golden Software, программный комплекс Oasis montaj от компании Geosoft и другие решения [6, 7].

К свободно распространяемым решениям, используемым в целях отображения деформаций поверхности Земли, можно отнести пакет консольных инструментов Generic Mapping Tools (GMT). Это полнофункциональная ГИС, управляемая через командные оболочки Unix-подобных систем (например, Bash) и предназначенная для быстрой автоматизированной обработки больших объемов данных и формирования карт и картосхем высокого полиграфического качества в формате интерпретируемого стекового языка описания страниц PostScript<sup>4</sup>. Долгое время многих начинающих специалистов вводило в замешательство отсутствие графического интерфейса у данной системы. В настоящий момент разработчиками и сообществом пользователей ведется активная разработка интерфейсов программирования приложений (API) для ряда языков программирования, включая C++, Fortran, Python, MATLAB и др., что позволит облегчить жизнь разработчикам программного обеспечения и упростить внедрение инструментов данной ГИС.

Группа исследователей из Иркутского национального исследовательского технического университета на примере родного города и территорий Восточной Сибири изучала возможности геоинформационного моделирования разломов и их последствий для устойчивости грунта. Неотектонические структуры исследуемой области визуализировались в трех измерениях с учетом наклона плоскости сброса по отношению к горизонтальной плоскости с использованием таких программных продуктов, как ArcGIS, Global Mapper и Paradigm Geophysical. Получаемая модель обеспечивает визуализацию, необходимую для обнаружения и ранжирования разломов и блоков, но только для верхней части пласта [8]. Данные полевой съемки были обработаны для представления разломно-блоковых структур на цифровой карте города Иркутска и его пригородов

<sup>4</sup> Generic Mapping Tools. Официальная документация. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.generic-mapping-tools.org/6.2/cookbook.html> (дата обращения: 11.06.2022).

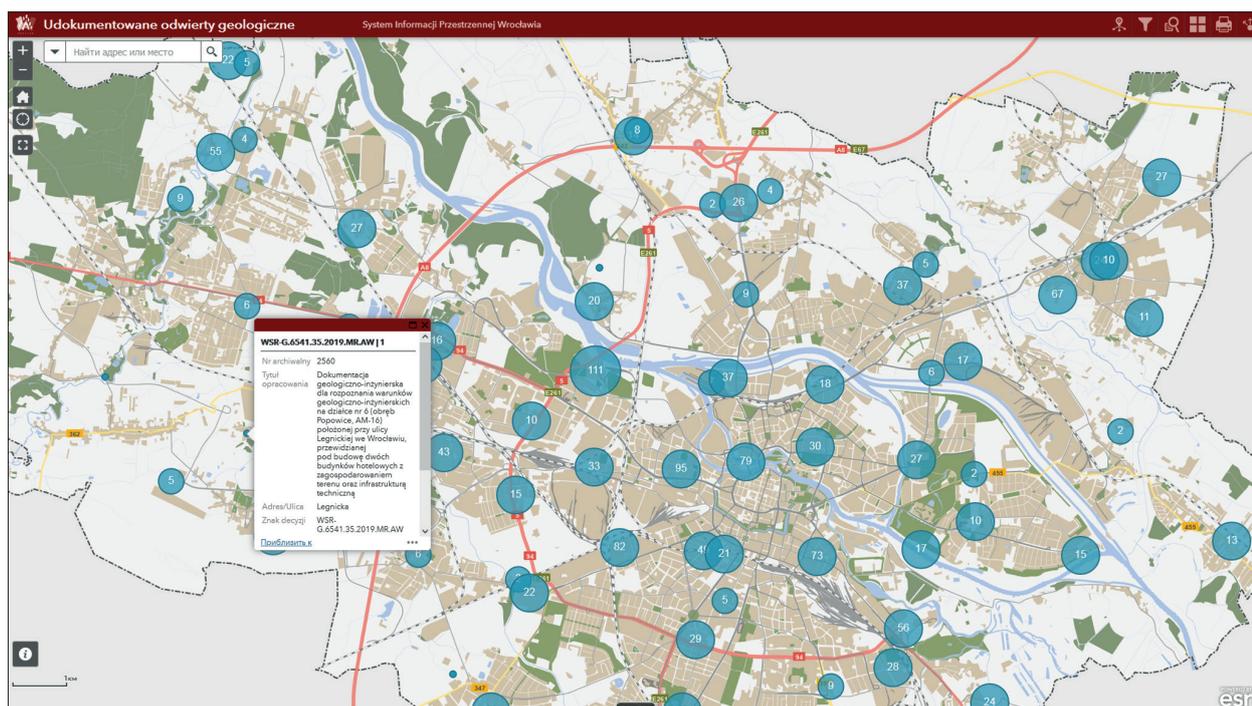
масштаба 1 : 25 000. Такого масштаба было достаточно для анализа устойчивости грунта на городских территориях средствами ГИС. Построению карты в ArcGIS Desktop 10 предшествовало создание базы данных (БД), которая включала слои разломов и рек.

Во Вроцлавском технологическом университете (Польша) была предложена архитектура информационной системы деформаций (DIS), предназначенной для решения задач в области деформаций горных пород в зонах добычи полезных ископаемых, и разработан ее прототип [9]. Ядро системы представляет собой интегрированную пространственно-атрибутивную базу данных, по аналогии с современными ГИС созданную на базе программной среды ArcGIS компании Esri. Помимо собранных от измерительных средств и обработанных пространственных и атрибутивных данных о горнодобывающей деятельности и ее влиянии на окружающую среду исследуемых районов, она включает планы горных работ масштаба 1 : 1000 – 1 : 5000 (местоположение, геометрия подземных выработок, используемые методы горных работ и временные данные о горнодобывающей деятельности), расположение геодезических пунктов и результаты геодезических измерений, данные о землепользовании и разработке земной поверхности. Основные компоненты системы реализованы на базе решений компании Esri (ArcObjects, ArcToolbox) и коммерческого программного пакета GeoModeller от компании Intrepid Geophysics средствами языков программирования VBA (Visual Basic for Applications) и Python.

К слабым сторонам данного проекта следует отнести применение коммерческого ПО при разработке ядра и основных модулей DIS. Апробация на антропогенных объектах – заброшенных шахтах, также указывает на необходимость проработки вопросов моделирования геологических и геодинамических процессов естественного происхождения с применением геоинформационных технологий. Реализация в виде настольной ГИС осложняет как подключение к системе внешних источников данных, так и ее интеграцию в инфраструктуру пространственных данных (ИПД) европейской инициативы INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in the European Community). Кроме того, в структуре базы данных (БД) DIS отсутствуют сведения о скважинах для оценки состояния и структуры грунтов.

В 2011 году специалистами Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева (ИГЭ РАН) была подготовлена карта опасности карстовых форм и карстово-суффозионных процессов на 1100 км<sup>2</sup> (без учета Троицкого и Новомосковского административных округов, вошедших в состав города позднее) территории г. Москвы в масштабе 1 : 10 000, обобщающая актуальные на тот момент данные об их пространственной локализации и созданная с применением классического настольного ГИС-редактора MapInfo Professional 8.0 и сопутствующей тематической базы данных [10].

Также в ИГЭ РАН была создана БД буровых скважин в рамках тематической ГИС, необходимой для выполнения ретроспективного анализа происхождения карстово-суффозионных провалов [11].



▲  
**Рис.1**

Карта геологических скважин, представленная на геопортале г. Вроцлав.

Несмотря на большой временной охват (последние 100 лет), она содержит пространственные и атрибутивные данные в виде сканированных листов буровых журналов, что является серьезным недостатком решения. Отсутствие данных сведений в сети Интернет (реализация в виде web-ГИС) также осложняет исследования научных коллективов в области геологии и геодинамики. Тем не менее, ее авторы считают, что дальнейшие исследования выявят новые и неучтенные провалы. В результате существующие и принятые научным и инженерным сообществом значения частоты и интенсивности провалообразования, лежащие в основе оценки геологического риска, изменятся.

Необходимо сделать небольшое отступление для анализа зарубежного опыта по вопросу картографирования скважин. Так, например, на геопортале города Вроцлав (Польша), реализованного с применением инструментального средства разработки ArcGIS API for JavaScript, представлены сведения об исследовательских буровых скважинах<sup>5</sup>. Карта геологических скважин подготовлена при поддержке департамента окружающей среды и сельского хозяйства городской администрации города Вроцлав (Рис. 1).

Помимо непосредственного представления локализации задокументированных скважин на территории города, интерактивная карта с сопутствующим инструментом поиска содержит следующую атрибутивную информацию: заданный номер архива, название проведенного геологического исследования, фактический адрес местоположения скважины, год выполнения исследования, номер

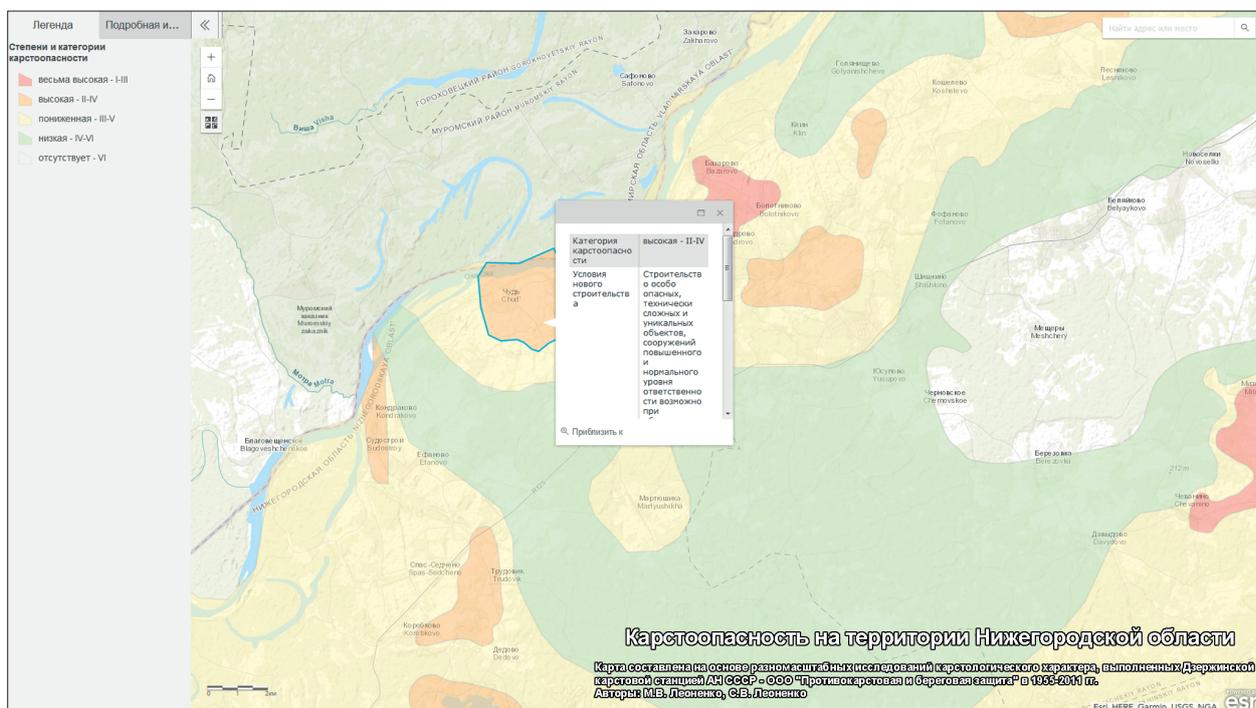
<sup>5</sup> Карта геологических скважин. Геопортал города Вроцлав (Польша). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gis.um.wroc.pl/portal/apps/webappviewer/index.html?id=13dbaff6de2468cae774af965bfd43> (дата обращения: 11.06.2022).

скважины, тип скважины и комментарии. Данные импортированы из утвержденной мэром Вроцлава геологической документации за 2019–2020 гг. В настоящее время происходит последовательное дополнение карты новыми данными, а также сведениями из архивов до 2019 года. Подробные данные о задокументированных скважинах, которые хранятся в геологическом архиве, доступны после подачи соответствующей заявки, которая размещена на сайте Бюллетеня общественной информации мэрии города<sup>6</sup>.

В лаборатории прогнозного моделирования в геосистемах Пермского государственного университета был создан геопортал на базе интерфейса программирования приложений ArcGIS API for JavaScript. Среди представленных проектов есть web-ГИС «Карстоопасность на территории Нижегородской области»<sup>7</sup>, переносимая в сеть Интернет разномасштабные исследования карста, выполненные ООО «Противокарстовая и береговая защита» в 1955–2011 гг. (Рис. 2). В легенде представлены пять категорий опасности карстово-суффозионных процессов. Например, село Чудь относится к категории «Высокая степень карстоопасности», а площадка под перспективную Нижегородскую АЭС [12] – село Монаково – к низкой, хотя и требующей проведения специальных изысканий.

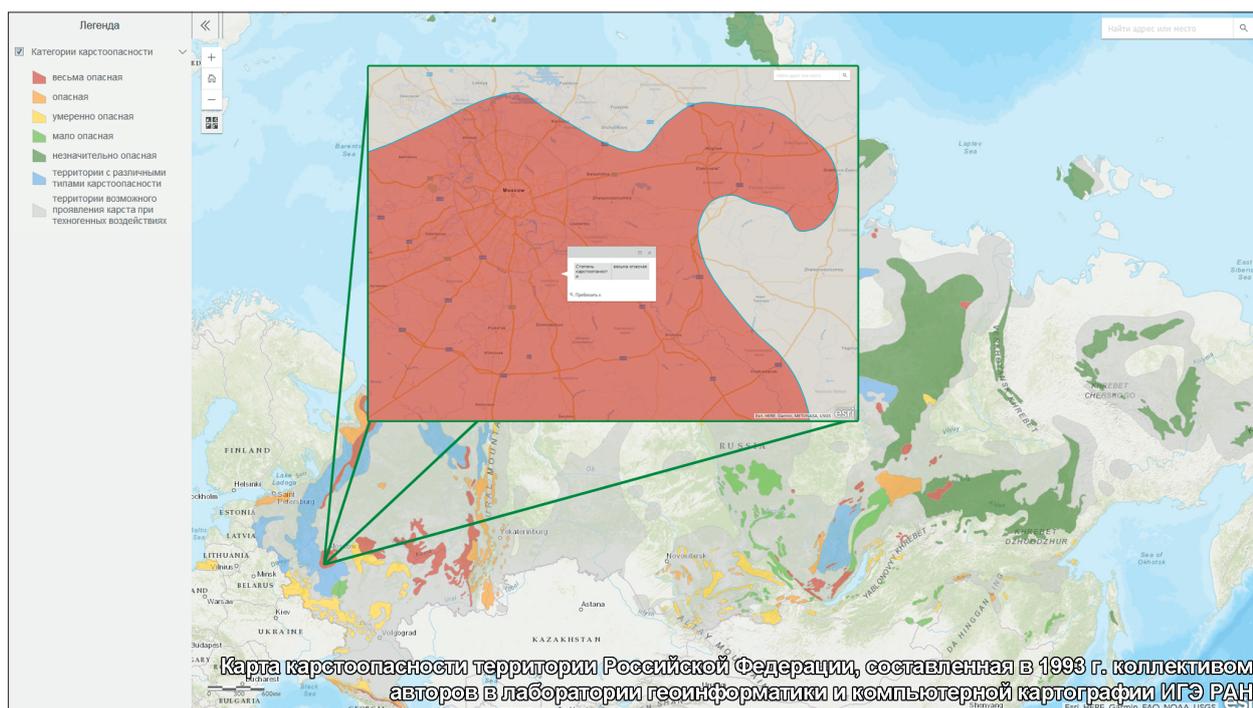
Также пользователям доступна ГИС «Карстоопасность на территории РФ» (Рис. 3). В ее основе лежат данные, полученные после векторизации карты карстоопасности территории Российской Федерации,

**Рис. 2**  
Web-ГИС «Карстоопасность на территории Нижегородской области», разработанная Пермским государственным университетом.



6 Бюллетень общественной информации мэрии г. Вроцлав (Польша). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bip.um.wroc.pl/> (дата обращения: 11.06.2022).

7 Электронные ГИС-проекты научно-производственной лаборатории прогнозного моделирования в геосистемах ПГНИУ // Лаборатория прогнозного моделирования в геосистемах ПГНИУ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://karst.psu.ru/files/gis/> (дата обращения: 11.06.2022).



**Рис.3**

Web-ГИС «Карстоопасность в РФ», разработанная Пермским государственным университетом (изображение отредактировано).

составленной в 1993 году коллективом авторов лаборатории геоинформатики и компьютерной картографии ИГЭ РАН. Опасность карста разделена на семь категорий.

Оригинальный масштаб данной карты составляет 1 : 15 000 000. При этом в самой ГИС выбор масштаба не ограничен. В результате территории Москвы и Московской области отнесены к категории «весьма опасная». Это не очень хорошо согласуется с результатами исследований, представленными в работах [10] и [11]. Кроме того, к картографическому исследованию Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева 1993 года прикладывалась карта территории города Москва в масштабе 1 : 500 000, показывающая неоднородность распределения карстовой и карсто-суффозионной опасности. В данной ГИС она не представлена. Такая же проблема наблюдается на картах, представленных на сайте ООО «Противокарстовая и береговая защита»<sup>8</sup>, которые, вероятно, также носят общеинформационный, обзорный характер.

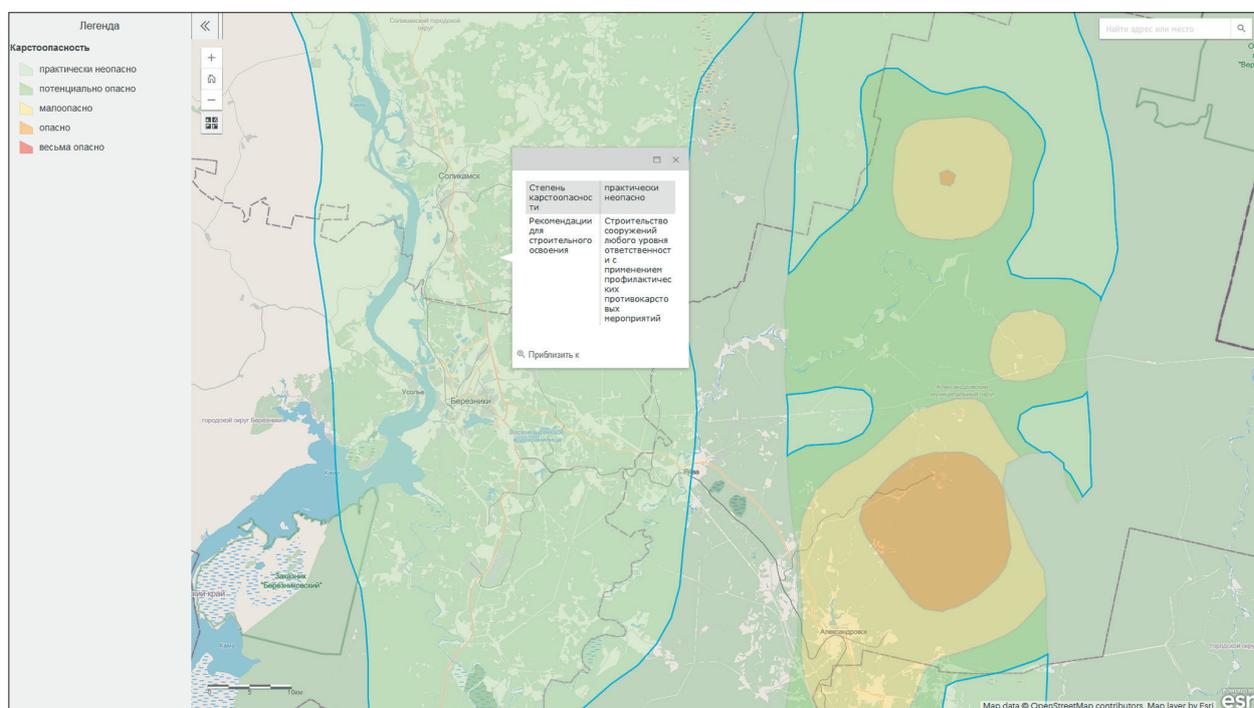
Пермский государственный университет ведет активную работу как по переносу выполненных в прошлом картографических исследований процессов развития карста на территории Российской Федерации в цифровую web-ГИС-форму<sup>7</sup>, так и по созданию ГИС мелкомасштабного районирования гидрогеологии приповерхностных водоносных горизонтов Пермского края [13]. Для ее создания были взяты материалы федеральной геологической съемки масштабов от 1 : 200 000 до 1 : 1 000 000, а также региональных (на уровне Пермского края) и локальных (в пределах города Перми)

<sup>8</sup> Портал ООО «Противокарстовая и береговая защита». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.antikarst.ru/karty/> (дата обращения: 11.06.2022).

гидрогеологических исследований. Отобранные карты и схемы сканировались, выполнялась привязка к системе координат СК-42, зона 10, а затем выполнялась векторизация в полуавтоматическом режиме в настольной ГИС ArcGIS 10.

Все представленные в ГИС данные разделены на категории «общие» (слои: административные границы, населенные пункты, реки и озера) и «тематические» (слои: гидрогеологические области, границы гидрогеологических областей, гидрогеологические горизонты и комплексы, глубина залегания подземных вод, минерализация подземных вод, водообильные зоны, трещинные зоны). Просмотр полученных результатов возможен с помощью бесплатного ГИС-зрителя ArcReader 10. К сожалению, на сайте лаборатории она отсутствует. Не представлена там и созданная с помощью продукции компании Esri ГИС «Сульфатный карст Пермского края», которая содержит информацию о количестве карстовых провалов в пределах районов с 1950 года, координатные привязки пещер и другую информацию [14]. Напротив, на геопортале лаборатории можно ознакомиться с ГИС карста Пермского края (Рис. 4), в основу которой положены данные о локализации и плотности КСВ, дешифрованных с топографических планов и материалов космической съемки<sup>7</sup>. Опасность карста разделена на пять категорий. Нужно отметить, что территория города Березники и города Соликамск отнесена к категории «практически неопасно». Возможно, это связано с техногенным происхождением провалов последних 38 лет.

**Рис. 4**  
Web-ГИС «Карстоопасность на территории Пермского края», разработанная Пермским государственным университетом.



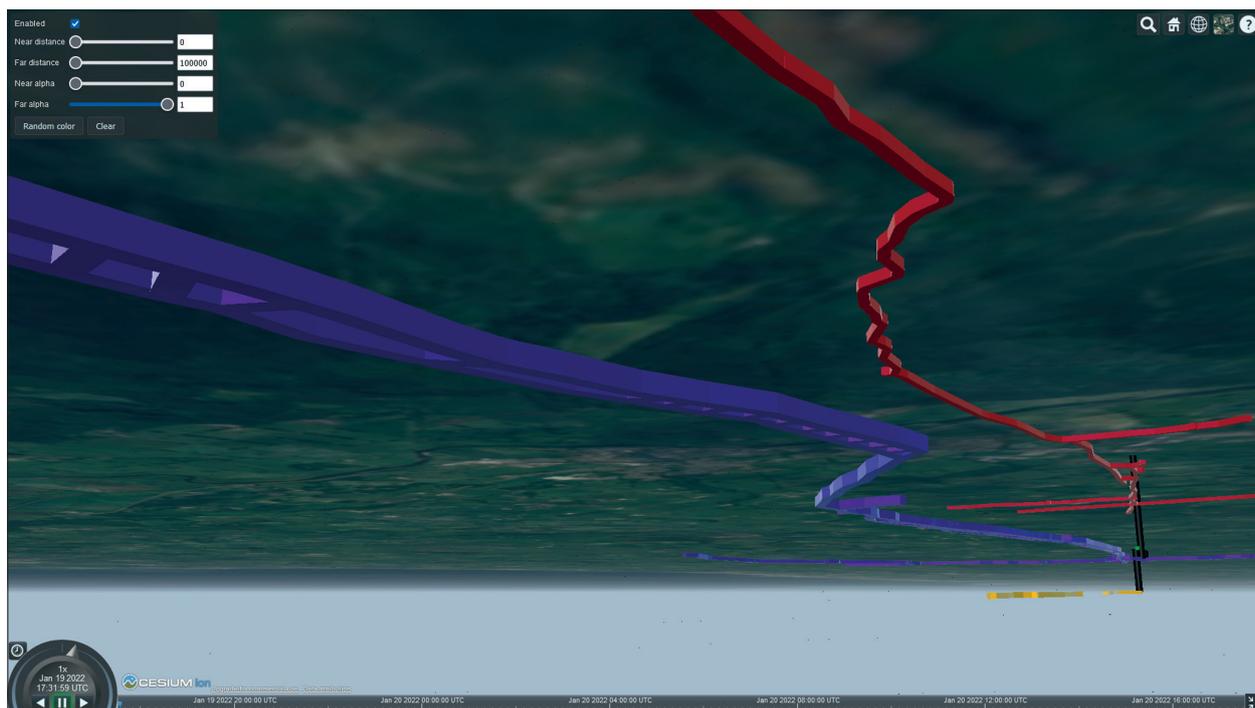
### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ отечественной и зарубежной литературы дает понять, что на текущий момент при поиске, анализе и картографировании карстово-суффозионных процессов современные геоинформационные технологии применяются в недостаточной мере. Уже существующие программные продукты не обладают всем необходимым функционалом. Попытки совместить специализированные программные средства, в том числе коммерческие, при создании комплексных систем геоинформационного анализа и моделирования геологических структур и явлений, включая КСВ, приводят к ряду проблем: совмещение форматов и библиотек (открытых и закрытых), применение программных средств не по прямому назначению (например, использование офисного пакета Microsoft Excel), риск прекращения доступа к сетевым и облачным ресурсам.

Так, все рассмотренные в этой работе web-ГИС-решения базируются на интерфейсе программирования приложений ArcGIS API for JavaScript – проприетарном средстве разработки web-картографических приложений, имеющем сильную интеграцию с экосистемой компании-разработчика [15, 16]. Данный интерфейс подходит для создания цифровых тематических карт и атласов, однако лишен математического ядра для обработки пространственных данных, в том числе потоков, а отрисовка трехмерных моделей при крупном масштабе отображаемой местности проходит с ошибками [16]. Напротив, инструментальное средство разработки ГИС Cesium обладает данными возможностями [17] и после последних обновлений обрело функцию работы с внутренними структурами Земли. Теперь пользователь может поместить модель некоторого объекта под земной поверхностью. В результате, можно создать стандартную цифровую карту из тайловых структур на трехмерном глобусе и одновременно с этим проводить анализ подземных антропогенных объектов и геологических структур в более понятном пользователю виде (Рис. 5)<sup>9</sup>.

В отличие от библиотеки CesiumJS, ArcGIS API for JavaScript имеет только пробную версию, ограниченную по времени работы. В случае Cesium пользователю предоставляется до 15 Гбайт трафика в месяц для передачи данных с серверов компании-разработчика (например, данных о рельефе или трехмерных моделей зданий), а также до 5 Гбайт свободного места на сервере для хранения собственных данных. Кроме того, в случае ArcGIS API загрузка пользовательских данных предусмотрена исключительно из облачного хранилища, что исключает возможность создания настольного приложения. В результате CesiumJS выглядит предпочтительнее при разработке

<sup>9</sup> Программная библиотека CesiumJS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cesium.com/platform/cesiumjs/> (дата обращения: 11.06.2022).



**Рис.5**

Пример отображения модели закрытой шахты по добыче свинца близ города Лланрвст, графство Уэльс (Великобритания). Сверху отрисованы отраженные тайлы земной поверхности, камера направлена изнутри модели Земли.

некоммерческих, научных проектов, а также проектов с длительной дорожной картой расширения функционала.

Таким образом, необходимо разработать составной программный комплекс, с клиентской и серверной составляющей, который позволил бы обеспечить быстрый доступ территориально распределенных пользователей для: обработки разнородных данных дистанционного зондирования (оптических, радиолокационных, лидарных) для выявления КСВ; моделирования карстовых процессов (объемные трехмерные динамические модели, описывающие изменение геометрических характеристик); фиксации событий провалообразования и ведения электронного архива; принятия управленческих решений об отправке специалистов (геологов и геодезистов) в зоны образования провалов и разломов.

При выполнении геоинформационного моделирования карстово-суффозионных процессов важно учитывать:

- Выбор системы отсчета.
- Масштаб используемых геопространственных данных.
- Оперативность обновления данных при актуализации модели.
- Повторяемость результатов моделирования.
- Различные виды отображения для улучшения понимания происходящих процессов и повышения наглядности для конечного потребителя – двумерное (полигоны и изолинии); трехмерное (послойное отображение с заданным шагом, вертикальный и горизонтальный срез); четырехмерные визуализации (3D-модель + шкала времени); отдельная отрисовка поверхности выявленных пустот и т. д.

## 4 ВЫВОДЫ

Составление и поддержка детальных цифровых карт местности, подверженной карстово-суффозионным процессам, необходима для безопасного планирования строительных работ в условиях сильного воздействия на геологию исследуемых территорий и минимизации социально-экономических рисков, которые могут варьироваться от косметического ремонта до сноса пострадавших зданий. Помимо прочего, важно выполнять и трехмерное геоинформационное моделирование геологических процессов путем создания объемных трехмерных динамических моделей, описывающих изменение геометрических характеристик провалов и разломов с течением времени, что возможно с применением графической библиотеки Cesium, а также вести учет электронного каталога геологических скважин с их внесением в ГИС. Очевидна и необходимость выполнения постоянного мониторинга малейших изменений имеющихся карстовых провалов и учет вновь возникающих.

**БЛАГОДАРНОСТИ** Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № 0708-2020-0001.

- БИБЛИОГРАФИЯ**
1. Барях А.А., Федосеев А.К. О механизме формирования карстовых провалов на земной поверхности // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. № 4. С. 12–22.
  2. De Carvalho Junior O.A, Guimarães R.F., Montgomery D.R., et al. Karst Depression Detection Using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-Derived Digital Elevation Models in the Bambuí Group, Brazil // Remote Sensing. 2014. Vol. 6. Iss. 1. P. 330–351. DOI:10.3390/rs6010330.
  3. Kim Y.J., Nam B.H., Youn H. Sinkhole Detection and Characterization Using LiDAR-Derived DEM with Logistic Regression // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Iss. 13. P. 1592. DOI:10.3390/rs11131592.
  4. Samsonov S., Baryakh A. Estimation of Deformation Intensity above a Flooded Potash Mine Near Berezniki (Perm Krai, Russia) with SAR Interferometry // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. Iss. 19. P. 3215. DOI:10.3390/rs12193215.
  5. Fu H., Fu B., Shi P. An Improved Segmentation Method for Automatic Mapping of Cone Karst from Remote Sensing Data Based on DeepLab V3+ Model // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Iss. 3. P. 441. DOI:10.3390/rs13030441.
  6. Логинов Д.С. Совершенствование картографического изображения геофизических полей: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.33 «Картография». М., 2017. 190 с.
  7. Грищенко Е.Н. Геодезический мониторинг динамики развития деформационного процесса земной поверхности на подрабатываемых территориях: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.32 «Геодезия». СПб., 2018. 135 с.
  8. Lobatskaya R.M., Strelchenko I.P. GIS-based analysis of fault patterns in urban areas: A case study of Irkutsk city, Russia //

- Geoscience Frontiers. 2016. Vol. 7. Iss. 2. P. 287–294. DOI:10.1016/j.gsf.2015.07.004.
9. Blachowski J., Milczarek W., Stefaniak P. Deformation information system for facilitating studies of mining-ground deformations, development, and applications // *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*. 2014. Vol. 14. Iss. 7. P. 1677–1689. DOI:10.5194/nhess-14-1677-2014.
  10. Кутепов В.М., Козлякова И.В., Анисимова Н.Г., Еремина О.Н., Кожевникова И.А. Оценка карстовой и карстово-суффозионной опасности в проекте крупномасштабного геологического картирования г. Москвы // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2011. № 3. С. 215–226.
  11. Аникеев А.В., Козлякова И.В., Кожевникова И.А. О поверхностных проявлениях карста в Москве // *Инженерная геология*. 2018. Т. 13. № 4–5. С. 74–88. DOI:10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-74-88.
  12. Глинский М.Л., Егорова В. А., Чертков Л. Г. Особенности геологического строения участка размещения Нижегородской АЭС и их учет в проектных решениях ее строительства // *Разведка и охрана недр*. 2012. № 10. С. 49–52.
  13. Щербаков С.В., Шилова А.В., Золотарев Д.Р. Применение ГИС-технологий при мелкомасштабном районировании гидрогеологических условий (на примере Пермского края) // *Вестник Пермского университета. Геология*. 2016. № 1 (30). С. 6–13.
  14. Кадебская О.И. Уточнение границ Соликамского карстового района // *Горное эхо*. 2020. № 3 (80). С. 8–12.
  15. Farkas G. Applicability of open-source web mapping libraries for building massive Web GIS clients // *Journal of Geographical Systems*. 2017. Vol. 19. Iss. 3. P. 273–295. DOI:10.1007/s10109-017-0248-z.
  16. Stähli L. Cesium vs. ArcGIS API for JavaScript. An assessment of the usability of virtual globe toolkits to create an animated 3D web scene: Scientific report / ETH Zurich, Institute of Cartography and Geoinformation, Cartography lab. Zurich: ICG, 2017. 20 p.
  17. Орлов П.Ю., Журкин И.Г. Использование графической библиотеки Cesium для создания web-ориентированных геоинформационных систем на примере ГИС околоземного космического пространства // *Научная визуализация*. 2018. Т. 10. № 3. С. 58–71. DOI:10.26583/sv.10.3.04.

**АВТОРЫ** **Орлов Павел Юрьевич**

Московский государственный университет геодезии  
и картографии, Москва, Россия

Кафедра геоинформационных систем и технологий  
Факультет геоинформатики и информационной безопасности  
кандидат технических наук

 0000-0002-5323-4754

Поступила 11.06.2022. Прошла рецензирование 08.08.2022. Принята к публикации 28.10.2022.