

Независимый электронный журнал ГеоИнфо

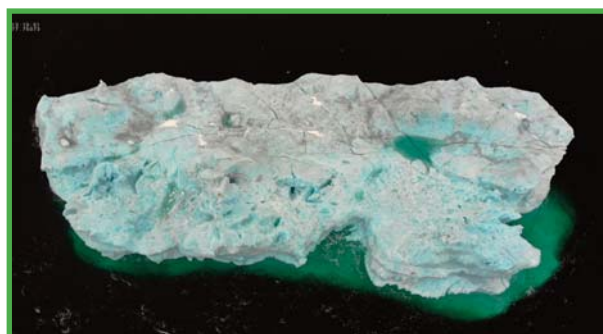
ОКТАБРЬ • 10–2022





Институт
экологического
проектирования
и изысканий

- Информационное сопровождение управления ледовой обстановкой (ИСУЛО)
- Оперативный спутниковый экологический мониторинг
- Производственный экологический мониторинг
- Программы сохранения биоразнообразия



119234, г. Москва,
Ленинские горы, д. 1, стр. 75Г
Телефон: +7 (495) 930-8751
E-mail: info@iepi.ru

WEB: WWW.IEPI.RU

АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**4D моделирование подводных археологических раскопок в условиях плохой видимости с помощью фотограмметрии** 6

ПАЧЕКО-РУИС РОДРИГО

Центр морской археологии Саутгемптонского университета, г. Саутгемптон, Великобритания

АДАМС ДЖОНАТАН

Центр морской археологии Саутгемптонского университета, г. Саутгемптон, Великобритания

ПЕДРОТТИ ФЕЛИКС

*Центр морской археологии Саутгемптонского университета, г. Саутгемптон, Великобритания***Получение 3D моделей с помощью недорогих камер видимого и инфракрасного диапазонов на БПЛА** 16

ДЕ ЛУИС-РУИС ХУЛИО-МАНУЭЛЬ

СЕДАНО-СИБРИАН ХАВЬЕР

ПЕРЕС-АЛЬВАРЕС РУБЕН

*Факультет горного дела и энергетики Университета Кантабрии, провинция Кантабрия, Испания**и др.***МЕХАНИКА ГРУНТОВ И ГЕОТЕХНИКА****Трехмерный конечноэлементный анализ устойчивости пещерного монастыря Саберееби (Грузия). Часть 1** 22

ДОМЕЙ ГИЗЕЛА

*Факультет наук о Земле и окружающей среде Миланского университета Бикоцца (г. Милан, Италия);**факультет гидрогеологии и инженерной геологии, факультет химии и наук о Земле Вильнюсского университета (г. Вильнюс, Литва)*

ПРЕВИТАЛИ МАРКО

Факультет естественных наук и инженерии Университета Данди, г. Данди, Великобритания

КАСТЕЛЛАНСА РИККАРДО

*Факультет наук о Земле и окружающей среде Миланского университета Бикоцца, г. Милан, Италия**и др.***ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ****Исследование стратиграфии формации, сложенной торфом и глиной, геофизическими методами (Малайзия)** 34

МОХАМАД ХАБИБ-МУСА

Инженерный факультет Малайзийского университета в Сабахе, г. Кота-Кинабалу, шт. Сабах, Малайзия

КАСБИ БАСРИ

Факультет инфраструктурной и геоматической инженерии Малайзийского университета имени Туна Хусейна Онна, г. Парит-Раджа, р-н Бату-Пахат, шт. Джохор, Малайзия

БАБА МУСТА

*Факультет естественных наук и природных ресурсов Малайзийского университета в Сабахе, г. Кота-Кинабалу, шт. Сабах, Малайзия**и др.***ИНЖЕНЕРНОЕ МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ. ГЕОКРИОЛОГИЯ****Геотехнологические и криозкологические условия «Таежного» железорудного месторождения в Южной Якутии** 46

ШАЦ МАРК МИХАЙЛОВИЧ

*Ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, к.г.н.***ПРИЛОЖЕНИЕ «ДИСКУССИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ»****Перспективы строительной отрасли в меняющемся климате: требуется решение перспективных задач АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА** 54**О «Золотом сечении» в геологии** 58

ЗАХАРОВ МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ

Профессор Национального открытого института, Санкт-Петербург, канд. геолого-минерал. наук, почётный изыскатель РФ

ГЕНЕРАЛЬНЫЕ СПОНСОРЫ ПРОЕКТА



ООО «ПЕТРОМОДЕЛИНГ»



Австрийская компания
«TRUMER SCHUTZBAUTEN GMBH»
ООО «РТ ТРУМЕР»



Институт
экологического
проектирования
и изысканий

АО «ИНСТИТУТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗЫСКАНИЙ»



Maccaferri / ГАБИОНЫ МАККАФЕРРИ СНГ



ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

ООО НПП «ГЕОТЕК»



Компания
Mountain Risk Consultancy

СПОНСОРЫ ПРОЕКТА



MalinSoft



ООО «МИДАС» / MIDAS IT



Геотехническая лаборатория
АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ»



ООО «НИЖЕГОРОДСТРОЙИЗЫСКАНИЯ»



ООО «ГЕОИНЖЕРВИС» / FUGRO

EngGeo

Обработка и хранение результатов
инженерно-геологических
изысканий

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «ENGCEO»



ООО «ПРОГРЕССГЕО»



НПО «ТЕРРАЗОНД»



ООО «КОМПАНИЯ «КРЕДО-ДИАЛОГ»

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ



Программный комплекс RosScience

ADVANCED SURVEY
TECHNOLOGIES

ООО «СОВРЕМЕННЫЕ ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ» (ADVANCED SURVEY
TECHNOLOGIES) - ОФИЦИАЛЬНЫЙ
ПРЕДСТАВИТЕЛЬ ROSSCIENCE В РОССИИ



ООО «КБ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ»

ООО НПП «ГЕОТЕК» - ВЕДУЩИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ, МЕРЗЛЫХ, КРУПНООБЛОМОЧНЫХ И СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ.

ПРИБОРЫ КРИОЛОГИЧЕСКИЕ СЕРИИ СТАНДАРТ

ХИТ продаж

Прибор компрессионный криологический ГТ 1.1.11



Прибор срезной криологический ГТ 1.2.14



Прибор шариковый штамп криологический ГТ 1.6.2



Температура окружающей среды **+5 (±2) С°**
 Прибор разработан для эксплуатации в холодильной камере (камера не входит в состав прибора)

ВОЗМОЖНОСТИ:

- автоматизированный режим испытания с поддержанием заданной отрицательной температуры каждого образца;
- прибор работает при пониженных температурах;
- автоматическое управление температурой образца;
- испытание до трех образцов в одном приборе;
- измерение температуры каждого образца.

ПРИБОРЫ ОБЕСПЕЧИВАЮТ ПРОВЕДЕНИЕ СЛЕДУЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ:

- **Прибор компрессионный криологический ГТ.1.1.11**
-испытание по ГОСТ 12248.10-2020 на сжатие и сжатие с оттаиванием;
- **Прибор срезной криологический ГТ 1.2.14**
-испытания по ГОСТ 12248.8-2020 на срез по поверхности смерзания;
-испытания по ГОСТ Р56726-2015 по определению касательных сил морозного пучения;
- **Прибор шариковый штамп криологический ГТ 1.6.2**
-испытания по ГОСТ 12248.7-2020 шариковым штампом.

ПОЧЕМУ ВЫБИРАЮТ НАС



Высокое качество



Выгодная цена



Надежный сервис



Экономия бюджета испытаний

440004, Россия, г. Пенза, ул. Центральная, строение 1М,
 +7(8412) 999-189, 8-800-200-16-05 (звонок по России бесплатный),
 sales@npp-geotek.ru, npp-geotek.com

* На правах рекламы



4D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДВОДНЫХ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ РАСКОПОК В УСЛОВИЯХ ПЛОХОЙ ВИДИМОСТИ С ПОМОЩЬЮ ФОТОГРАММЕТРИИ

ПАЧЕКО-РУИС РОДРИГО (PACHECO-RUIZ RODRIGO)

Центр морской археологии
Саутгемптонского университета,
г. Саутгемптон, Великобритания
R.Pacheco-Ruiz@sofon.ac.uk

АДАМС ДЖОНАТАН (ADAMS JONATHAN)

Центр морской археологии
Саутгемптонского университета,
г. Саутгемптон, Великобритания

ПЕДРОТТИ ФЕЛИКС (PEDROTTI FELIX)

Центр морской археологии
Саутгемптонского университета,
г. Саутгемптон, Великобритания

Предлагаем вниманию читателей немного сокращенный адаптированный перевод статьи «4D моделирование подводных археологических раскопок в условиях плохой видимости в болгарской части Черного моря с использованием фотограмметрии на основе многокамерной съемки», опубликованной в 2018 году в *International Journal of Geological and Environmental Engineering* («Международном журнале по инженерной геологии и инженерной защите окружающей среды») известным издательством академических журналов с открытым доступом World Academy of Science, Engineering and Technology («Всемирной академией наук, инженерии и технологий») по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). Эта лицензия позволяет копировать и распространять материал на любом носителе и в любом формате, адаптировать, видоизменять и использовать в любых целях, включая коммерческие, при указании ссылки на первоисточник. В нашем случае ссылка приведена в конце перевода. Авторами указанной статьи являются Родриго Пачеко-Руис, Джонатан Адамс и Феликс Педротти – сотрудники центра морской археологии Саутгемптонского университета (Великобритания).

В данной статье рассказывается о пользе применения фотограмметрии для подводной съемки археологических объектов для создания 4D моделей. Фотограмметрия применяется на подводных археологических раскопках уже по крайней мере с 1970-х годов, и сегодня создание с ее помощью традиционных 3D моделей становится обычной практикой. Указанный метод, как правило, применяют при ярком освещении и при видимости под водой более 1 м, что снижает возможность его применения для изучения большинства затопленных археологических памятников в более мутной воде. В последние годы цифровые фотосенсоры и оптические технологии были усовершенствованы и стали идеально подходить для более плохой видимости. Такие разработки в сочетании с мощными компьютерными системами для обработки данных позволили успешно использовать фотограмметрию в качестве стандартного инструмента регистрации и интерпретации данных по подводным археологическим раскопкам. В представленной публикации рассказывается о результатах ежедневных подводных съемок раскопок, содержащих археологические объекты возрастом начиная с 3300 года до н. э., в болгарской части Черного моря при видимости менее 0,5 м. Эти съемки выполнялись пятью камерами GoPro5 Hero Black, зафиксированными на одном каркасе, который перемещался под водой аквалангистом.

Полученные результаты показали, что фотограмметрию можно и нужно использовать в качестве одного из основных методов съемки подводных объектов, представляющих интерес в отношении археологии, даже при слабом освещении. Впрочем, с точки зрения редакции «Геоинфо», рассмотренная в статье технология исследований может пригодиться не только для археологических исследований, но и для некоторых видов инженерных изысканий для подводного строительства (археологических, инженерно-геодезических, инженерно-геологических, инженерно-экологических), а также при исследованиях изменений климата и уровня моря по данным археологических раскопок под водой.

ВВЕДЕНИЕ ►

Среди методов фиксации объектов, выявленных при археологических раскопках, давно стала обязательной фотография наряду с созданием обычных чертежных планов, профилей и разрезов. На основе объединения разных методов уже несколько десятилетий назад начали корректировать стереофотографии. Но для археологических объектов, оказавшихся под водой, все было сложнее. Ухудшение освещенности, потеря цвета и контраста на глубине, усугубляемые любыми взвешенными твердыми частицами, представляют собой набор ограничений, которые долгое время было нелегко преодолеть. Это, безусловно, было так для первого подводного фотографа Луи Бутана (Louis Boutan) в 1890-х годах и даже для Джорджа Басса, который провел первые профессиональные подводные археологические раскопки в 1960 году [1]. Подводное фотографирование археологических памятников, где видимость обычно бывает плохой, представляло собой сложную задачу. В попытках решить ее методом подводной съемки с огромным потенциалом еще в 1970-х годах была признана фотограмметрия [2]. Например, раскопки тюдоровского военного корабля «Мэри Роуз» в Великобритании в 1971–1982 годах сопровождались длительными экспериментами с камерами, объединением изображений, 3D съемками и ранними попытками создания программного обеспечения для 3D фотограмметрии [3, 4].

С тех пор революцию в подводной фотографии и, в частности, в применении фотограмметрических методов при исследованиях археологических раскопок произвели две новые технологии. Цифровая фотография устранила ограничения, связанные как с количеством кадров, которые можно было получить во время погружения, так и с необходимостью проявления пленки, чтобы можно было увидеть результаты. Много дало и развитие программного обеспечения. Запатентованные программные пакеты для фотограмметрии доступны уже много лет, но долгое время они были либо сложны в использовании, либо не обеспечивали необходимой точности. Но за последние 5 лет

(к моменту написания статьи в 2018 году. – *Ред.*) были разработаны простые в использовании программы, дающие очень точные результаты.

В данной работе представлена адаптация фотограмметрии к специфическим условиям подводных археологических раскопок с ограниченной видимостью.

Местом исследований была защищенная бухта Ропотамо в Черном море в Южной Болгарии, где свидетельства приморской жизни людей уходят своими корнями в доисторические времена. Раскопки проводились в рамках долгосрочного международного проекта по морской археологии Черного моря Black Sea MAP (Black Sea Maritime Archaeology Project), посвященного реакции человека на изменения окружающей среды в конце доисторических времен. Помимо раскопок в 2017 году команда Black Sea MAP провела 3 сезона морских геофизических исследований и отбора геологических проб, а также зарегистрировала 65 мест затонувших кораблей на глубине до 2140 м. Основным методом регистрации этих судов была подводная фотограмметрия, и это дало команде обширный опыт в получении изображений с достаточными качеством, разрешением и ориентацией для успешного получения 3D изображений кораблей, затонувших за 2500 лет мореплавания. Именно этот опыт был направлен на решение проблем точной регистрации трехмерных положений и взаимосвязей объектов при исследованиях археологических раскопов в Ропотамо. Это приходилось делать не только в условиях плохой видимости (иногда менее 1 м), но и ежедневно, чтобы не отставать от развития процесса раскопок. Добавление времени к трем пространственным измерениям позволило создавать четырехмерные (4D) модели процесса археологических исследований под водой с высоким разрешением.

ПОДВОДНЫЕ АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАСКОПКИ ►

Место раскопок в бухте Ропотамо представляет собой глубоко стратифицированный объект, представляющий археологический интерес. Накопленные там археологические материалы отра-

жают значительную человеческую деятельность начиная с 3300 года до н. э. и по крайней мере до XVII века н. э. Важность этого места была очевидна с момента первых археологических раскопок, проведенных в 1980-х годах профессором Иваном Караятовым (Ivan Karayotov) [5]. Ропотамо (когда-то – поселение, а затем – гавань) имеет большое значение не только с археологической точки зрения, но и для понимания того, как человеческие сообщества реагировали на климатические изменения, в частности на изменение относительного уровня моря.

С 2015 года в рамках проекта Black Sea MAP, возглавляемого Центром морской археологии Саутгемптонского университета, собираются археологические и палеоэкологические данные в прибрежных и морских зонах. Обоснование необходимости осуществления этого проекта заключалось в том, что выявление процессов и хронологии изменений климата в голоцене расширит понимание того, какое влияние они оказали на человеческие популяции в этом районе в конце доисторических времен.

Морские кампании в рамках указанного проекта помогли обнаружить 65 новых мест кораблекрушений прошлого за почти 2500 лет мореплавания в Черном море начиная с конца V века до н. э. Соответствующие наборы данных были дополнены 92 образцами ядра осадочных пород, взятыми на побережье, континентальном шельфе и континентальном склоне, что позволило команде ответить на давно обсуждаемые вопросы о характере затопления суши Черным морем после максимума последнего оледенения (около 22 тыс. лет назад) [6–13].

Подводные раскопки в Ропотамо служили связующим звеном между археологическими находками, недавно обнаруженными остатками затонувших кораблей и богатыми палеоэкологическими наборами данных, собранными к настоящему времени. Цель состояла в том, чтобы детальнейшим образом проследить историю человеческой деятельности в Ропотамо с использованием наборов 4D фотограмметрических данных с высоким разрешением.

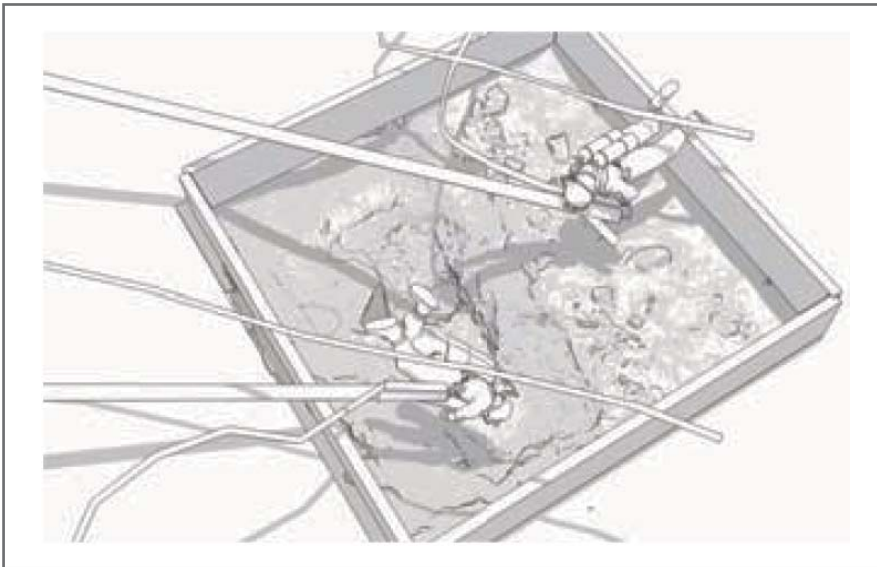


Рис. 1. Схематическое изображение подводных археологических раскопок, выполняемых аквалангистами с использованием подводных грунтоотсасывающих устройств (рис. Родриго Пачеко-Руиса)



Рис. 2. Морской археолог аккуратно удаляет рыхлые отложения из раскопа в условиях плохой видимости (фото Йохана Роннби (Johan Ronnby))

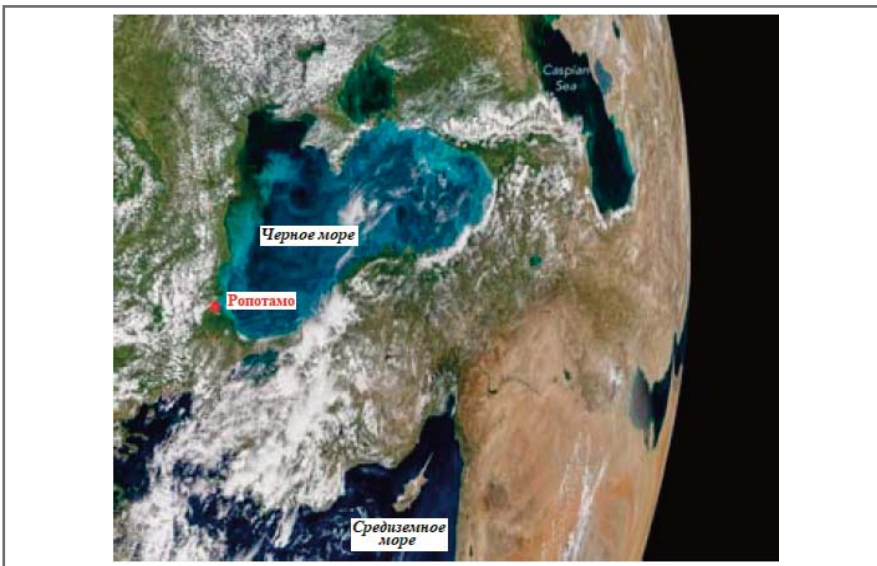


Рис. 3. 29 мая 2017 года спектрорадиометр среднего разрешения (MODIS), установленный на спутнике NASA Aqua, зафиксировал данные для этого изображения, представляющего собой мозаику, составленную из нескольких проходов спутника. На изображении по зеленым оттенкам видно «цветение» воды в Черном море, вызванное массовым развитием фитопланктона

Использование фотограмметрии не только позволило вести миллиметровую фиксацию процесса раскопок во времени и пространстве. В процессе этих работ также осваивались новые направления исследований. С точки зрения авторов, это первый случай, когда при подводных раскопках были успешно (с высокими уровнями детализации и точности) зафиксированы ежедневные изменения, то есть было добавлено четвертое измерение.

Рассматриваемые раскопки в Ропотамо выполнялись на основе вышеупомянутой работы Ивана Карайотова [5],

который определил важность этого места еще в 1980-х годах, а также благодаря концентрации археологических материалов, найденных до глубины 20 см от уровня морского дна. В соответствии с результатами морских геофизических исследований была очерчена представляющая археологический интерес площадь, в пределах которой было выполнено два раскопа размерами по 5 м x 5 м. Средняя глубина археологических раскопок составила 2,3 м ниже современного среднего уровня Черного моря. В каких-то местах они достигли слоя раннего бронзового века на глубине 5,7 м.

В связи с рыхлым характером морского дна было решено защитить подлежащие раскопкам участки от загрязнения морскими отложениями с помощью двух открытых кессонов размерами по 5 м x 5 м.

При подводных раскопках использовались такие грунтоотсасывающие средства, как водоструйные эжекторы, предназначенные для археологических работ (рис. 1). Отложения, окружающие археологический материал, удалялись руками или ручными инструментами (рис. 2). Как только выявлялся археологический материал, аквалангисты проводили подводную фотограмметрическую съемку раскопов одновременно несколькими камерами. Подводные работы выполнялись специально обученными морскими археологами, имевшими опыт научного и коммерческого дайвинга.

ПОДВОДНЫЕ УСЛОВИЯ ►

Весной 2017 года в Черном море наблюдалось необычное «цветение» воды, вызванное массовым развитием кокколитофор (рис. 3) (кокколитофоры, или кокколитофориды, – группа морских одноклеточных планктонных водорослей, у большинства из которых имеется наружный скелет из известковых пластинок – кокколитов. – *Ред.*). Это событие отрицательно сказалось на подводной видимости, превратив раскопки в Ропотамо в сложную среду для подводной фотографии со средней видимостью для камеры менее 0,5 м.

В то время как фотограмметрия под водой широко используется, когда ви-

димость значительно превышает 0,5 м [14, 15], мало что известно о применимости этого метода в вышеуказанных плохих условиях.

По мере улучшения видимости создание фотограмметрических моделей становится все проще. Недостаток же света препятствует получению четких изображений объектов, а ведь четкость имеет решающее значение для создания фотограмметрических моделей хорошего качества. В мутной воде искусственный свет от видеоосветителей или фотовышек имеет тенденцию генерировать обратное рассеяние, что приводит к передержкам и проблемам с фокусировкой. Более эффективным средством является уменьшение расстояния от камеры до объекта, как это делалось в Ропотамо.

МЕТОДОЛОГИЯ ►

Применение обычных методов фотограмметрии с использованием одной или двух камер в имеющихся условиях плохой видимости было бы недостаточным для достижения целей проекта по ежедневной регистрации каждого раскопа площадью по 25 кв. м. В качестве примера на рисунке 4, а показан охват наблюдаемого пространства для камеры, оснащенной объективом с фокусным расстоянием 35 мм. В качестве альтернативы при видимости менее 50 см изыскатель должен находиться ближе к объекту съемки, уменьшая охват и позволяя меньше перекрывать фотографии, как показано на рисунке 4, б.

Как хорошо известно, фотограмметрический охват трехмерного объекта требует достаточного количества изображений с перекрытиями между соседними снимками. В то время как в воздухе этого можно добиться, перемещая камеру (или лазерный сканер) вокруг объекта, постепенно увеличивая охват, под водой это достигается путем перемещения камеры дайвером над объектом и вокруг него по встречным, круговым или спиралевидным траекториям. Однако изменения места съемки влияют на результаты фотограмметрической обработки. В динамичной подводной среде, такой как активные археологические раскопки, трудно поддерживать «визуальную устойчивость». Взвешенные осадки, пузырьки газа, движение флоры и фауны в толще воды могут изменить изображение морфологии площадки даже в ходе короткой съемки. Они изменяют кажущиеся контуры, оттенки и контрастность объектов и могут привести к получению наборов изображений, многие из которых невозможно совместить друг с другом в зонах перекрытий.

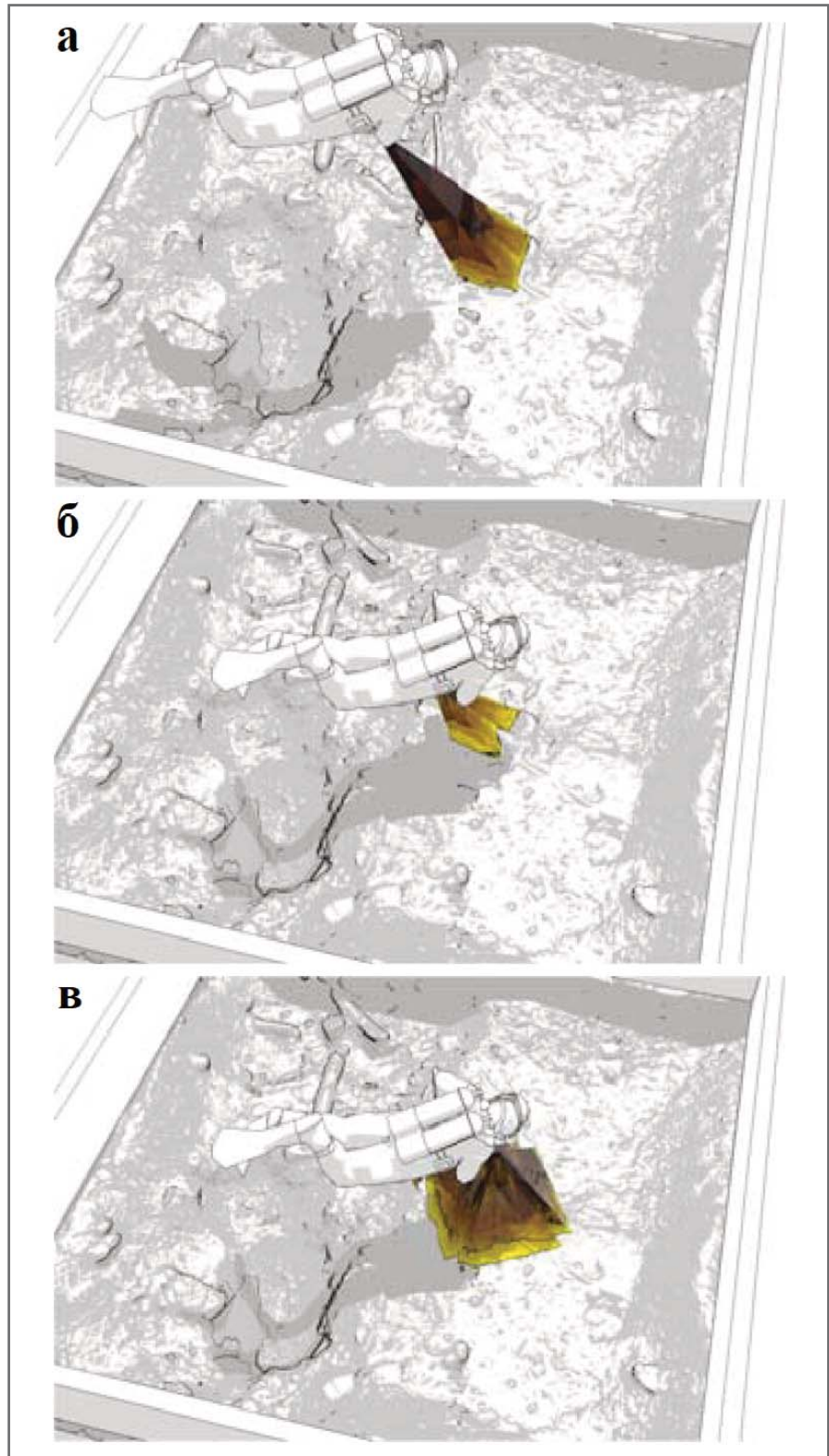


Рис. 4. Схематические рисунки, показывающие охват наблюдаемого пространства для фотографического оборудования при подводной съемке: а – обычной подводной фотокамерой DSLR при фокусном расстоянии 35 мм и видимости более 50 см; б – обычной подводной фотокамерой DSLR при фокусном расстоянии 35 мм и видимости менее 50 см; в – пятью камерами GoPro HERO5 Black, закрепленными на специальной установке, изготовленной с помощью 3D-принтера, при фокусном расстоянии 5 мм и видимости менее 50 см (рис. Родриго Пачеко-Руйса)

Чтобы преодолеть потенциальные проблемы, связанные с изменением морфологии места съемки, было решено создать установку (достаточно легкую, чтобы любой дайвер мог использовать

ее под водой), на которой можно было бы закрепить несколько камер, которые могли бы работать при низкой освещенности и делать фотографии на расстоянии менее 0,5 м, – в данном случае пять



Рис. 5. Морской археолог ведет подводную съемку в условиях видимости менее 0,5 м (фото Йохана Роннби (Johan Ronnby))

камер GoPro Hero 5 Black Edition (рис. 5). Затем такая установка была создана из полилактида (полимолочной кислоты, PLA) на 3D-принтере, а для закрепления на ней камер использовалась шарнирная система, поставляемая с этими камерами. Схематические изоб-

ражения данной установки показаны на рисунке 6.

Пять камер устанавливались на изготовленной на 3D-принтере конструкции следующим образом. Четыре камеры прикреплялись по краям установки на равных расстояниях друг от друга. Противостоящие камеры в каждой из двух пар (см. рис. 6) были направлены внутрь под углом 38 град. вниз от горизонтали. Пятая камера закреплялась посередине установки и была обращена вертикально вниз. Угол обзора всех камер обеспечивал перекрытие снимков. Расположение и угол наклона камер на установке были наилучшими для их фокусного расстояния 3 мм. Перекрытие поля обзора (FOV) каждой камеры с полями обзора всех четырех других не только обеспечивало 100%-ный охват исследуемой поверхности и существенное перекрытие снимков, но и в значительной степени устраняло проблемы, вызванные изменениями морфологии площадки, о которых говорилось выше.

Стратегия съемки ▶

За счет применения созданной на 3D-принтере установки были увеличены время съемки и охват исследуемой поверхности. Пять камер одновременно

делали по снимку с разрешением 4000 x 3000 пикселей каждые 2 секунды, используя присущую этим камерам функцию Time Lapse («серийная поккадровая съемка с временным интервалом»). Оператор плавал по определенным траекториям, а не просто вокруг объекта, как это часто бывает при обычной подводной фотограмметрической съемке, и объект был полностью снят сверху, спереди, сзади, слева и справа. Преимущество этого метода заключалось в том, что он не только сводил к минимуму время фотограмметрической съемки, но и помогал дайверу выдерживать курс съемки и, следовательно, избегать путаницы в условиях плохой видимости.

Поскольку эта методика тестировалась во время кампании, был проведен ряд испытаний для разработки идеальной траектории съемки. Первоначально использовалась трансектная траектория: дайвер, управлявший съемочной установкой, плавал взад и вперед по запланированным параллельным трансектам, чтобы сделать достаточное количество снимков для обеспечения перекрытий между ними более чем на 50% (рис. 7, а). Хотя этот метод мог бы обеспечить достаточный охват площадки в

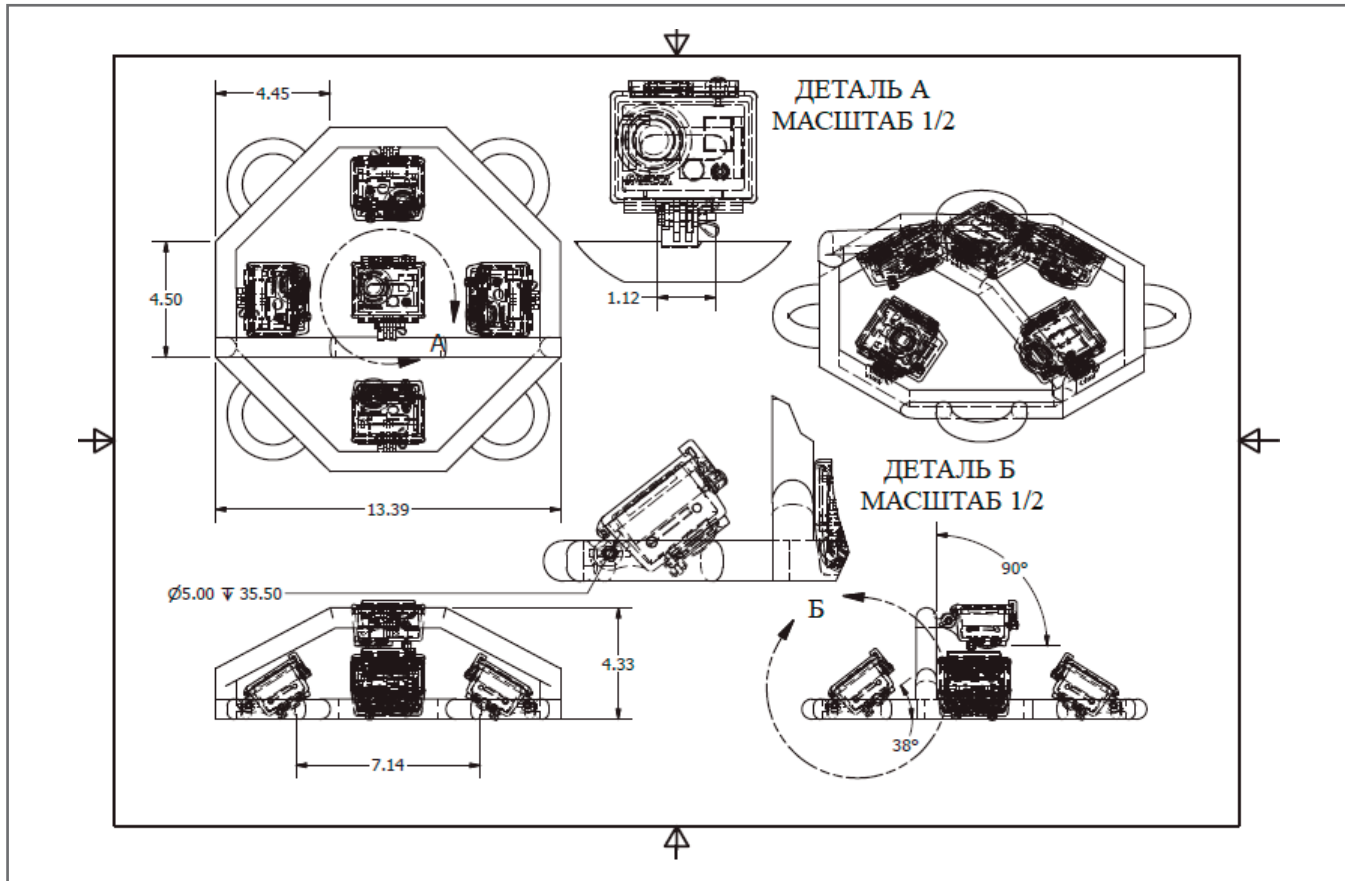


Рис. 6. Схемы созданной с помощью 3D-принтера полусферической установки, необходимой для подводной фотограмметрии. Детали А и Б показывают места прикрепления камер GoPro Hero 5. Все размеры указаны в миллиметрах (рис. Родриго Пачеко-Руиса и Феликса Педротти)

условиях подводной видимости более 1 м, он не позволял последовательно отображать панели кессонов. А это было важно, поскольку открытый кессон площадью ровно 25 кв. м использовался не только для защиты, но и для географической привязки и масштабирования каждого раскопа.

Поэтому был необходим альтернативный метод для сбора фотограмметрических данных при видимости менее 0,5 м. Наиболее эффективным посчитали обследование площадки по спирали, как показано на рисунке 7, б. Это действительно оказалось более успешным в условиях плохой видимости, поскольку обеспечивалась повышенная «непрерывность» съемки с перекрытием снимков более чем на 50%, что, в свою очередь, облегчило последовательность обработки и совмещения изображений по перекрытиям в программе Agisoft PhotoScan Pro.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ►

В день каждой съемки фотографии передавались на обработку, для которой использовались две рабочие станции (два компьютера) Dell Precision Tower 7810. Вычислительная мощность процессора каждой из них обеспечивалась 16 ядрами (2 x Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2699 v3 @ 2,30 ГГц) с дополнительными 192 ГБ оперативной памяти, в то время как обработка графической информации обеспечивалась видеокартой NVIDIA Quadro 6000 для каждого компьютера. Эти устройства были опробованы командой ранее во время двух морских исследований на борту судна MPSV Stril Explorer, а затем на борту MPSV Havila Subsea уже во время выполнения проекта Black Sea MAP в 2016 и 2017 годах. Обработка выполнялась с использованием программы Agisoft PhotoScan Pro version 1.3.2 build 4206.

В общей сложности с 8 по 27 июня 2017 года было сделано 80128 снимков. Обработка проводилась после каждой дневной съемки в течение ночи. Она была автоматизирована с помощью скрипта на языке Python, разработанного для выполнения последовательных фотограмметрических рабочих процессов, которые совмещали снимки по перекрытиям, а также оптимизировали положение и настройки камер, применяли предварительно откалиброванные настройки, создавали плотное облако точек, генерировали триангуляционную сетку Делоне (Delauney) и вычисляли

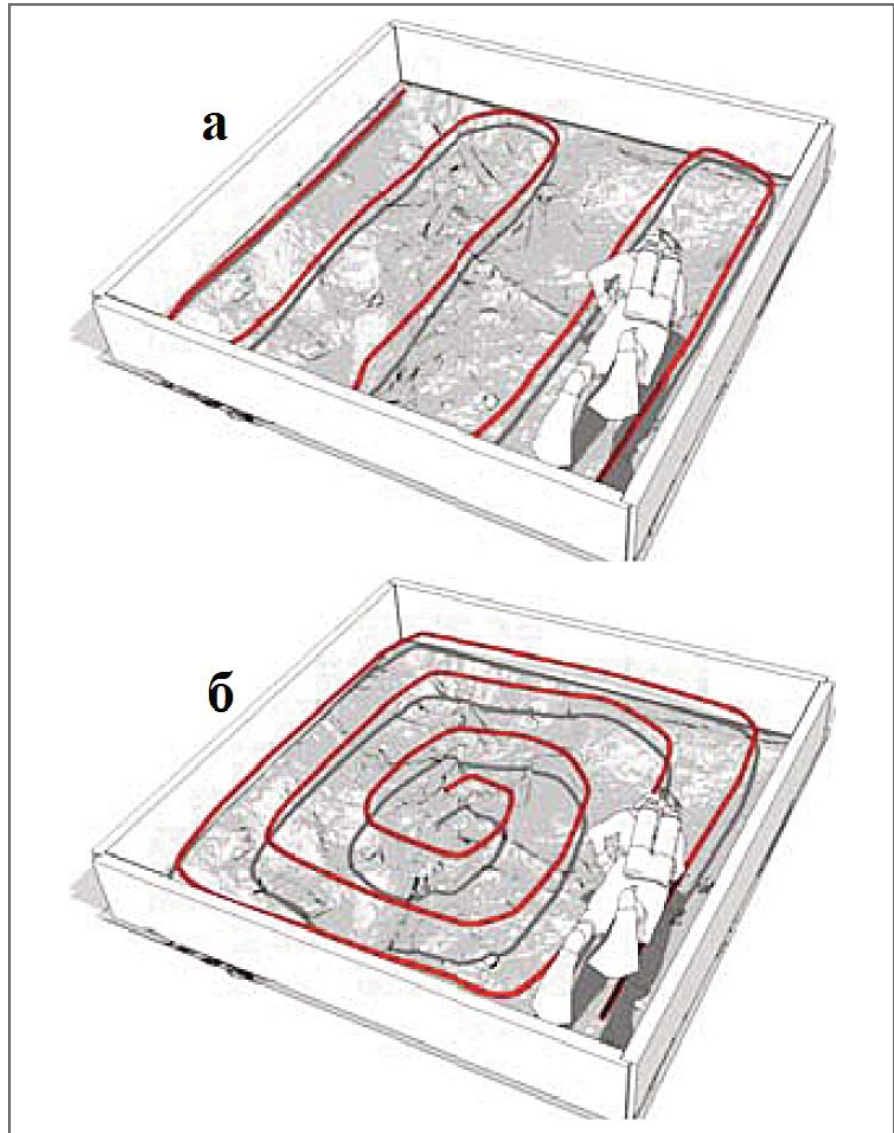


Рис. 7. Траектории перемещения оператора подводной фототехники в различных условиях видимости: а – первоначальная традиционная съемка по транsekтам; б – съемка по спиральной траектории (рис. Родриго Пачеко-Руйса)



Рис. 8. Использование тахеометра Leica FlexLine TS06plus для географической привязки неподвижных точек раскопов (фото Майкла Гранта (Michael Grant))

текстуру всей поверхности для просмотра результатов перед следующей съемкой.

Для раскопа 1 было выполнено 15 съемок. Среднее количество снимков за съемку составило 2263, количество

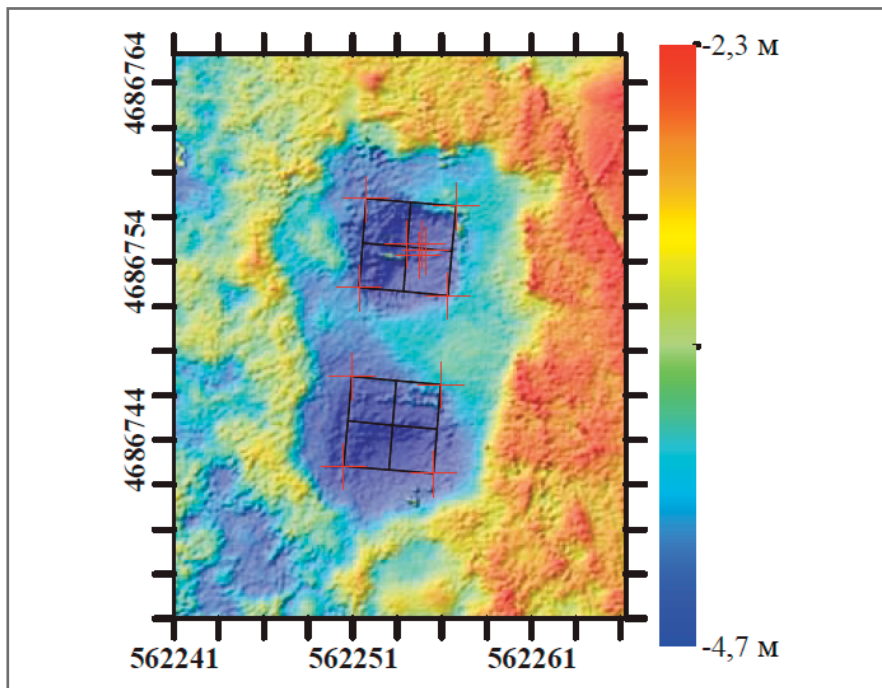


Рис. 9. Карта, показывающая опорные точки, используемые для масштабирования и географической привязки наборов фотограмметрических данных. На изображении также можно оценить корреляцию опорной точки с помощью батиметрической многолучевой съемки. Глубина указана в метрах ниже среднего уровня Черного моря (изображение Родриго Пачеко-Руиса)

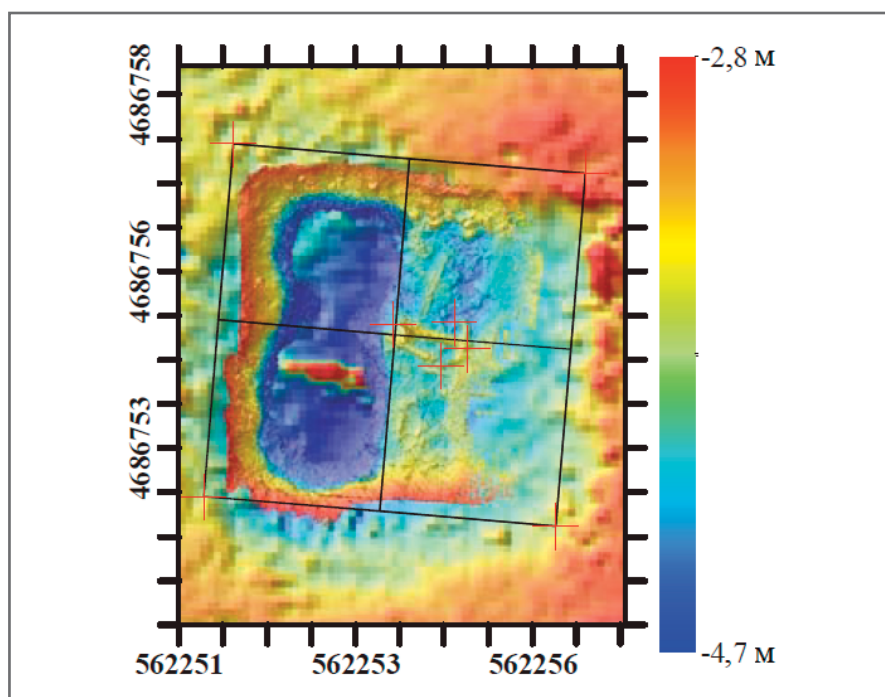


Рис. 11. Карта, демонстрирующая взаимосвязь и корреляцию между фотограмметрической моделью рельефа раскопа 2, набором данных батиметрической многолучевой съемки и опорными точками (показанными красными перекрестиями), привязанными и откоррелированными с помощью непосредственного обследования и соответствующей программы (DSM – Direct Survey Method) и географически привязанными с использованием тахеометра. Глубина указана в метрах ниже среднего уровня Черного моря (изображение Родриго Пачеко-Руиса)

точек фотографирования (позиций камер) – 1293, общих точек (точек привязки) для соседних изображений – 963072.

Для раскопа 2 было выполнено 19 съемок. Среднее количество снимков за съемку составило 2430, количество точек фотографирования – 2037, общих



Рис. 10. Использование маркеров программы Agisoft Pgtoscan Pro для более хорошего автоматического совмещения снимков при обработке (фото Феликса Педротти)

точек (точек привязки) для соседних изображений – 1376644.

В целом за съемку каждого раскопа охватывалось 25 кв. м со средним разрешением 0,223 мм на пиксель (1,13 мкм x 1,13 мкм) со средней высоты 37,12 см от морского дна.

В результате в общей сложности было получено 58124 совмещений снимков и 40602335 общих точек (точек привязки) для соседних изображений.

Географическая привязка и масштабирование ▶

Географическая привязка наборов 4D фотограмметрических данных была выполнена с использованием углов и стыков 2,5-метровых панелей кессонов, которые окружали раскопы размерами по 5 м x 5 м. Благодаря небольшой глубине каждого из двух таких участков можно было использовать тахеометр Leica FlexLine TS06plus с тахеометрической дальномерной рейкой длиной 3 м с отражателем для определения произвольных положений (x, y, z) углов. Отражатель располагался вертикально над целью и удерживался на месте дайверами, в то время как направление и расстояние измерялись геодезистами с четырех разных станций на берегу (рис. 8). Впоследствии каждой береговой станции было присвоено географическое местоположение в зоне 35N системы координат UTM с использованием системы кинематического позиционирования в реальном времени DGPS.

Напомним, что 4D моделирование учитывает изменения в пространстве и времени. Поскольку цель рассматриваемых исследований состояла в том, чтобы изучить 2 археологических раскопа со 100% охватом, ключевым фактором успеха была точная регистрация данных

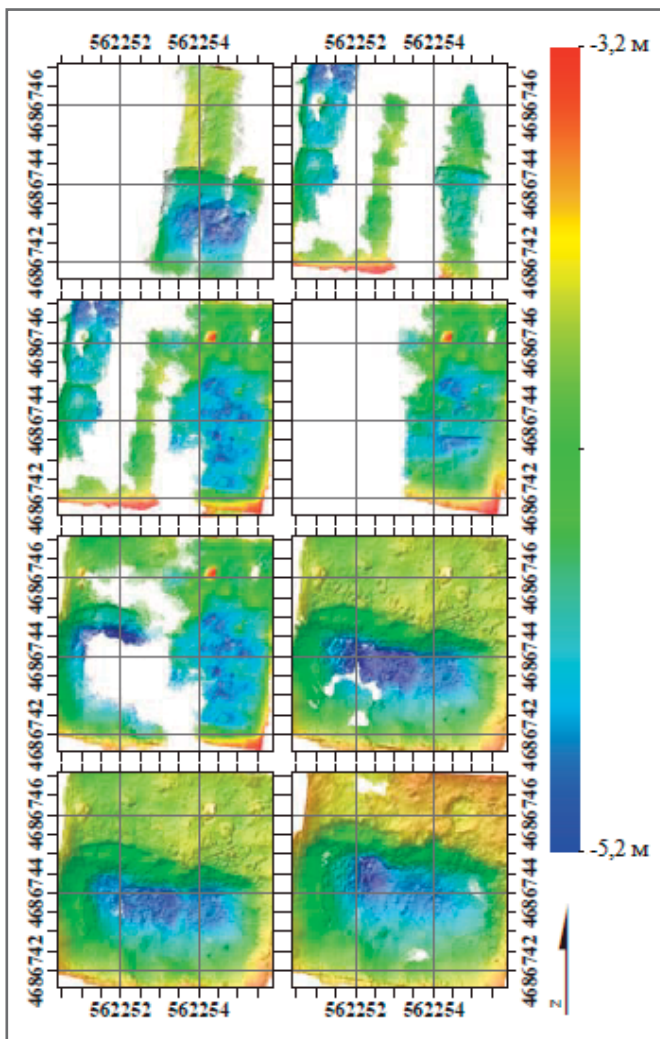


Рис. 12. Последовательность 3D моделей, которые формируют 4D модель подводного археологического раскопа 1 в заливе Ропотамо. Изображения сверху вниз и слева направо (от верхнего левого изображения до нижнего правого) соответствуют съемкам 8, 15, 18, 20, 24, 25, 26, 27 июня (изображение Родриго Пачеко-Руиса)

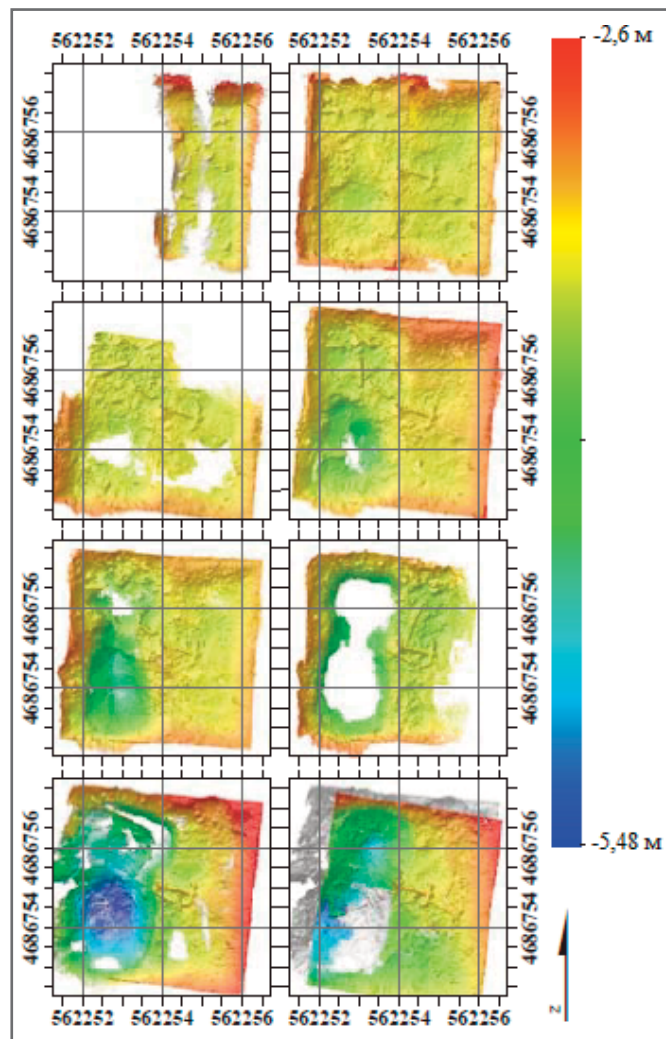


Рис. 13. Последовательность 3D моделей, которые формируют 4D модель подводного археологического раскопа 2 в заливе Ропотамо. Изображения сверху вниз и слева направо (от верхнего левого изображения до нижнего правого) соответствуют съемкам 11, 18, 20, 21, 22, 23, 26, 27 июня (изображение Родриго Пачеко-Руиса)

во времени и пространстве. Очень эффективным способом сохранения общих привязок (постоянных точек отсчета) для многочисленных съемок оказалось использование углов неподвижных панелей каждого из раскопов (рис. 9). Чтобы расширить возможности фотограмметрического совмещения снимков с помощью программы Agisoft PhotoScan Pro, было также решено разместить маркеры программы Agisoft Photoscan Pro на внутренних гранях и в верхних углах панелей, как показано на рисунке 10, поскольку они автоматически распознаются этой программой. Поэтому панели кессонов должны были быть частью исследования вместе с чисто археологическими. По мере продвижения работ по раскопкам некоторые археологические объекты также функционировали как дополнительные точки привязки для масштабирования и географической коррекции. Одним из содержащих такие

точки объектов был византийский якорь, аналогичный тем, что были найдены на затонувшем корабле Tantara F начала VIII века н. э. [16, 17] (рис. 11).

Масштабирование было выполнено путем ввода известных размеров панелей кессона в каждую из фотограмметрических моделей. Второй независимый способ масштабирования моделей заключался в трилатерации расстояний между всеми метками и определении их 3D координат с использованием программы DSM (Direct Survey Method), широко используемой в морской археологии [18]. Третий, и последний, метод использовался в качестве подстраховки для масштабирования и географической привязки моделей путем сравнения полученных 4D фотограмметрических моделей с результатами батиметрической многолучевой съемки залива Ропотамо, проведенной после завершения раскопок. На рисунке 11 показана корреля-

ция фотограмметрических моделей и результатов батиметрической многолучевой съемки.

Рабочие наборы данных ▶

Таким образом, наборы 4D фотограмметрической информации по подводным археологическим раскопкам в Ропотамо в 2017 году состояли из комбинации разных типов входных данных. Во-первых, велась пространственно-временная запись каждого этапа археологических раскопок с использованием фотограмметрии высокого разрешения по данным от разных камер. Во-вторых, выполнялось внедрение методов геолокации и масштабирования для корреляции таких наборов данных в пространстве и времени с использованием методов кинематики в реальном времени (RTK), тахеометров, непосредственного обследования и соответствующей программы (DSM – Direct Survey

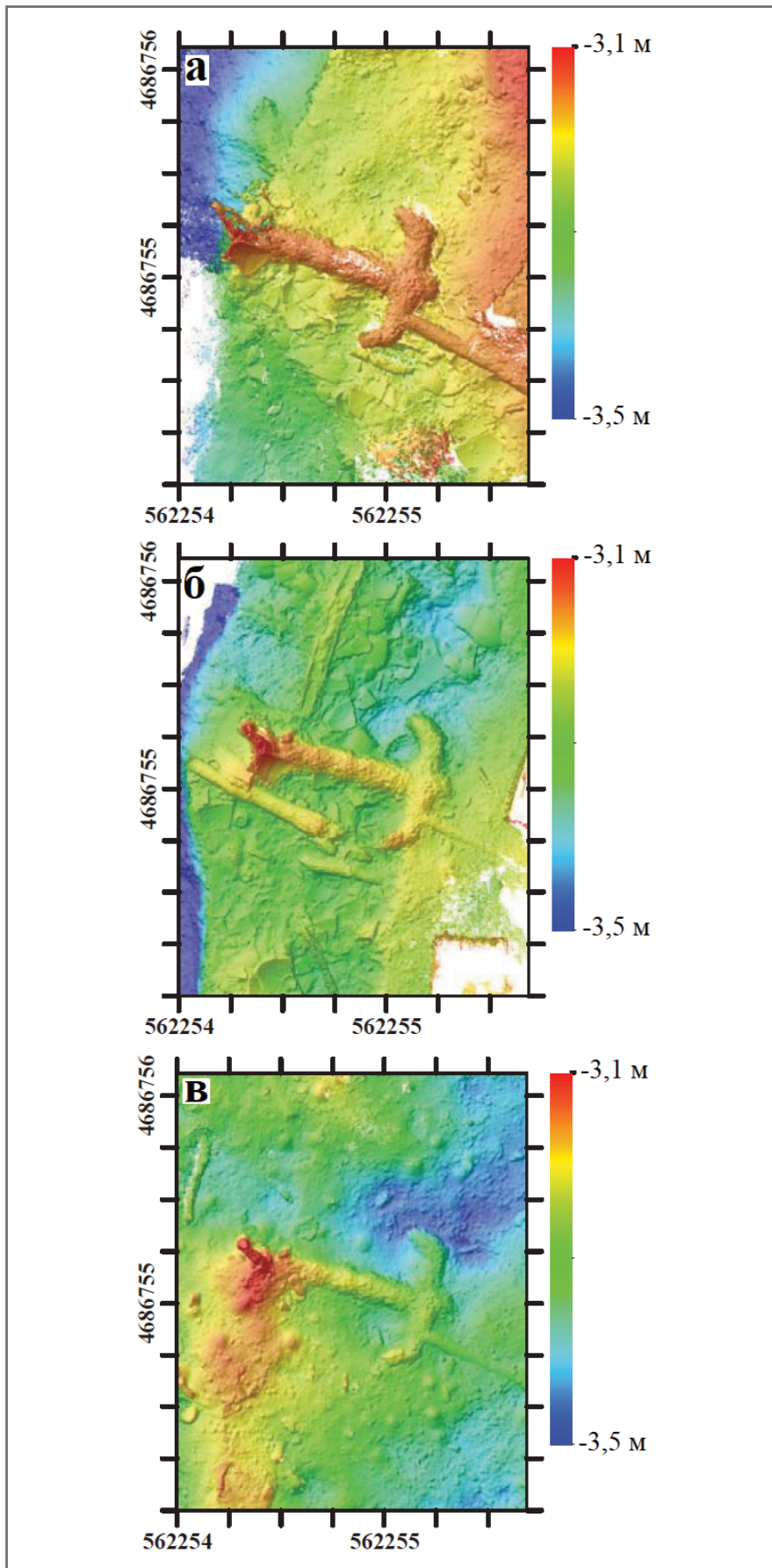


Рис. 14. Изображения, демонстрирующие использование 4D фотограмметрического моделирования для понимания этапов осадконакопления в хронологическом порядке: а – якорь лежит поверх слоя более раннего керамического материала, но – якорь с большим количеством керамического материала, накапливающегося по бокам и сверху; в – якорь и связанный с ним археологический материал, закрытые тонким слоем рыхлого песка на этапах заброшенности (изображение Родриго Пачеко-Руиса)

Method), а также сравнения полученных данных с результатами многолучевой батиметрической съемки, проведенной по окончании выполнения программы раскопок.

В результате такого комбинирования было получено 16 трехмерных записей раскопок 1 и 2, которые при добавлении такого параметра, как время, создали две 4D модели каждого раскопа. На рисунках 12 и 13 показаны результаты съемки на каждом этапе. Команде было ясно, что использование 4D моделирования имело преимущество в том, что оно фокусировалось на сложности регистрации археологических данных и в меньшей степени на методах регистрации.

Многие результаты были получены благодаря использованию таких наборов данных в качестве инструментов интерпретации. Во-первых, можно было количественно оценить скорость процесса раскопок, а это увеличивало документацию по любому конкретному археологическому вмешательству и его последующему анализу в лаборатории. Другими словами, 4D моделирование помогало отслеживать разные этапы раскопок благодаря высокой скорости обработки данных, что, в свою очередь, позволяло принимать более обоснованные решения по оптимизации хода полевых работ и управлению ими. Однако более важной была возможность детальнее изучить площадку и лучше понять природу отложений в археологическом отношении. Возможность возвращаться к каждому этапу раскопок, фактически перемещаясь назад и вперед во времени, значительно помогла понять процессы формирования изучаемых мест с помощью интерпретаций: каждый обнаруженный и смоделированный слой позволял формулировать идеи и итеративно уточнять их.

На основе этого удалось построить более детальную стратиграфическую последовательность изучаемого места, связанную с событиями прошлого, что, в свою очередь, помогло объяснить многопериодное заселение Ропотамо. Наглядный пример этого можно увидеть на рисунке 14, где показаны различные этапы раскопок вокруг византийского якоря в раскопе 2. Из полученной четырехмерной модели видно, что якорь попал в это место, когда гавань все еще использовалась, поскольку видно, что он лежит на плотном слое антропогенного материала, состоящего преимущественно из керамики (рис. 14, а). По бокам якоря и над ним отложено еще большее количество керамического ма-

териала, что предполагает постоянное использование этой зоны в течение византийского периода (рис. 14, б). Еще выше отложен тонкий слой морского песка, который свидетельствует об этапе заброшенности участка (рис. 14, в). Таким образом, путем виртуального снятия слоев на каждом этапе раскопок можно было гораздо более детально понять археологический контекст отложений, чем при простой регистрации особенностей поверхности участка до и после процесса раскопок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

В этой статье продемонстрирована применимость фотограмметрической съемки в условиях плохой видимости (менее 0,5 м) для ежедневного документирования процесса археологических раскопок под водой.

В публикации приводятся доводы в пользу использования таких наборов данных для создания пространственно-временных моделей в целях улучшения

понимания сложной природы отложенных антропогенных материалов. Использование четырехмерных наборов данных необходимо для создания инструментов для их интерпретации, что, в свою очередь, помогает принимать более обоснованные решения по процессу археологических раскопок.

Таким образом, подводные раскопки в заливе Ропотамо в болгарской части Черного моря продемонстрировали, что четырехмерная регистрация хода археологических раскопок может иметь множество преимуществ при получении археологической информации.

Одной из наиболее важных была возможность проследить этапы раскопок, рассмотреть используемые методы и, что наиболее важно, взаимосвязь между археологическими элементами на участке.

Таким образом, использование мощных компьютерных технологий и сбор изображений с высоким разрешением позволяет получить гораздо более богатое пространственно-временное пред-

ставление результатов подводных археологических раскопок в условиях плохой видимости. ■

Авторы хотели бы поблагодарить трест Джулли и Ханса Раузинг и их образовательно-исследовательский фонд (EEF) за дальновидное финансирование и поддержку проекта Black Sea MAP и такой его части, как раскопки в Ропотамо. Команда проекта Black Sea MAP была создана на основе партнерства между Центром морской археологии в Саутгемптоне и Центром подводной археологии в Созополе, а также Институтом морских археологических исследований в Содерторне и Университетом Коннектикута. Производственными партнерами, предоставившими платформу для разработки методологии, были компании ММТ, СаТНХ и Agisoft. Команда также благодарна всем болгарским властям и администрациям, которые сделали эту работу возможной.

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

Pacheco-Ruiz R., Adams J., Pedrotti F. 4D modelling of low visibility underwater archaeological excavations using multi-source photogrammetry in the Bulgarian Black Sea // Geological and Environmental Engineering (international journal). World Academy of Science, Engineering and Technology, 2018. Vol. 12. № 4. URL: zenodo.org/record/1316478#.Y1gy4qBBxkg; publications.waset.org/search?q=4D+modelling+of+low+visibility+underwater+archaeological+excavations+using+multi-source+photogrammetry+in+the+Bulgarian+Black+Sea.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►

1. Bass G.F. Archaeology under water // Ancient peoples and places. New York, 1966.
2. Green J. Maritime archaeology: a technical handbook. Academic Press, 1990. 282 p.
3. Rule M. The Mary Rose: The Excavation and Raising of Henry VIII's Flagship. London: Conway Maritime Press, 1982. 224 p.
4. Rule N. Some techniques for cost-effective three-dimensional mapping of underwater sites // BAR International Series. 1995. Vol. 598. P. 51.
5. Karayotov I. The Antique and Medieval port at the mouth of the river Ropotamo // Acta TAB. 1990. Vol. 5. P. 64–66.
6. Lister C.J., Hiscott R.N., Aksu A.E., Mudie P.J. Compositional trends through the Holocene mud succession of the southwestern Black Sea shelf: implications for sedimentary provenance and water-level history // Sedimentary Geology. 2015. Vol. 316. P. 13–25.
7. Lericolais G., Bourget J., Popescu I., Jermannaud P., Mulder T., Jorry S., Panin N. Late Quaternary deep-sea sedimentation in the western Black Sea: new insights from recent coring and seismic data in the deep basin // Global and Planetary Change. 2013. Vol. 103. P. 232–247.
8. Bruckner H., Kelterbaum D., Marunchak O., Porotov A., Vott A. The Holocene sea level story since 7500 BP lessons from the Eastern Mediterranean, the Black and the Azov Seas // Quaternary International. 2010. Vol. 225. № 2. P. 160–179.
9. Yanko-Hombach V., Gilbert A.S., Dolukhanov P. Controversy over the great flood hypotheses in the Black Sea in light of geological, paleontological, and archaeological evidence // Quaternary International. 2007. Vol. 167–168. P. 91–113.
10. Popescu I., Lericolais G., Panin N., Normand A., Dinu C., Le Drezen E. The Danube submarine canyon (Black Sea): morphology and sedimentary processes // Marine Geology. 2004. Vol. 206. № 1–4. P. 249–265.
11. Aksu A.E., Gillespie H., Mudie P.J. Dino flagellate cysts, freshwater algae and fungal spores as salinity indicators // Late Quaternary cores from Marmara and Black Seas. 2002. Vol. 190. № 1–2. P. 203–231.
12. Aksu A.E., Hiscott R.N., Ya D. Oscillating Quaternary water levels of the Marmara Sea and vigorous outflow into the Aegean Sea from the Marmara Sea Black Sea drainage corridor // Environmental Science, Geography. Marine Geology. 1999. Vol. 153. P. 275–302.
13. Ryan W.B.F., Pitman W.C., Major C., Shimkus K., Moskalenko V., Jones G.A., Dimitrov P., Goriir N., Saking M., Yiice H. An abrupt drowning of the Black Sea shelf // Marine Geology. 1997. Vol. 138. № 1. P. 119–126.
14. McCarthy J., Benjamin J. Multi-image photogrammetry for underwater archaeological site recording: an accessible, diver-based approach // Journal of Maritime Archaeology. 2014. Vol. 9. № 1. P. 95–114.
15. Beltrame C., Costa E. 3D survey and modelling of shipwrecks in different underwater environments // Journal of Cultural Heritage. 2017. Vol. 29. P. 82–88.
16. Barkai O., Kahanov Y., The Tantura F Shipwreck, Israel // International Journal of Nautical Archaeology. 2007. Vol. 36. № 1. P. 21.
17. Eliyahu M., Barkai O., Goren Y., Eliaz N., Kahanov Y., Ashkenazi D. The iron anchors from the Tantura F shipwreck: typological and metallurgical analyses // Journal of Archaeological Science. 2011. Vol. 38. № 2. P. 233–245.
18. Rule N. The Direct Survey Method (DSM) of underwater survey, and its application underwater // International Journal of Nautical Archaeology. 1989. Vol. 18. № 2. P. 157–162.



ПОЛУЧЕНИЕ 3D МОДЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ НЕДОРОГИХ КАМЕР ВИДИМОГО И ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНОВ НА БПЛА

ДЕ ЛУИС-РУИС ХУЛИО-МАНУЭЛЬ (DE LUIS-RUIZ JULIO-MANUEL)

Факультет горного дела и энергетики
Университета Кантабрии, провинция
Кантабрия, Испания
deluisj@unican.es

СЕДАНО-СИБРИАН ХАВЬЕР (SEDANO-SIBRIAN JAVIER)

Факультет горного дела и энергетики
Университета Кантабрии, провинция
Кантабрия, Испания

ПЕРЕС-АЛЬВАРЕС РУБЕН (PEREZ-ALVAREZ RUBEN)

Факультет горного дела и энергетики
Университета Кантабрии, провинция
Кантабрия, Испания

ПЕРЕДА-ГАРСИЯ РАУЛЬ (PEREDA-GARCIA RAUL)

Факультет горного дела и энергетики
Университета Кантабрии, провинция
Кантабрия, Испания

ПИНЬЯ-ГАРСИЯ ФЕЛИПЕ (PINA-GARCIA FELIPE)

Факультет горного дела и энергетики
Университета Кантабрии, провинция
Кантабрия, Испания

Предлагаем вниманию читателей немного сокращенный адаптированный перевод статьи «Получение 3D моделей с помощью недорогих камер видимого и инфракрасного диапазонов, установленных на БПЛА», опубликованной в *International Journal of Geological and Environmental Engineering* («Международном журнале по инженерной геологии и инженерной защите окружающей среды») известным издательством академических журналов с открытым доступом *World Academy of Science, Engineering and Technology* («Всемирной академией наук, инженерии и технологий») по лицензии *Creative Commons Attribution* 4.0 International (CC BY 4.0). Эта лицензия позволяет копировать и распространять материал на любом носителе и в любом формате, адаптировать, видоизменять и использовать в любых целях, включая коммерческие, при указании ссылки на первоисточник. В нашем случае ссылка приведена в конце перевода. Авторами указанной статьи являются Хулио-Мануэль де Луис-Руис, Хавьер Седано-Сибриан, Рубен Перес-Альварес, Рауль Переда-Гарсия и Фелипе Пинья-Гарсия, являющиеся представителями факультета горного дела и энергетики Университета Кантабрии (Испания).

В настоящее время для проведения разведки и/или исследований археологических памятников принято прибегать к аэрофотосъемке. В последние годы в качестве транспортных средств, несущих датчики, применяются беспилотные летательные аппараты (БПЛА, дроны). Это имеет определенные преимущества, такие как возможность использования достаточно дешевых датчиков, поскольку БПЛА могут летать на относительно небольших высотах. В последнее время стали применяться недорогие комбинированные системы из двух типов камер. Такое новое оборудование при исследовании археологических памятников может взаимодействовать с классическими цифровыми моделями рельефа (ЦМР), но это влечет за собой необходимость оптимизации технологии сбора, обработки и использования информации, предоставляемой двойными сенсорами.

Представленное исследование позволяет утверждать, что термическая природа исследуемого участка не дает о нем основных данных, но в сочетании с другими видами информации, такими как ЦМР, типология материалов и т. д., она может давать результаты, очень нужные для достижения целей исследования той или иной территории.

ВВЕДЕНИЕ ►

До сих пор для получения представления об изучаемой территории использовался такой метод, как фотограмметрия. Эта дисциплина имеет отношение в том числе к археологии, поскольку позволяет получить картографическую основу, на которой запечатлен археологический объект [1]. Эволюция фотограмметрии в последние годы была замечательной как в инструментальном и методологическом отношении, так и с точки зрения получаемого конечного продукта. Если в 1950-х годах этот метод позволял получать с помощью аэрофотоснимков точные стереограммы и, следовательно, классическую аналоговую картографическую продукцию, то в течение следующих 50 лет были внедрены картографирование в цифровом формате и работа с цифровыми моделями рельефа (ЦМР). Одно из применений ЦМР сосредоточено в области археологии, где можно оценить земляные работы, размеры раскопок, интуитивно определить направление, в котором простирается конкретный археологический объект, в зависимости от возвышений и понижений местности и т. д.

Появление беспилотных летательных аппаратов (БПЛА, дронов) в начале XX века привело к расширению фотограмметрической технологии [2] – в основном за счет упрощения используемых методов и аппаратуры, но прежде всего за счет резкого сокращения затрат [3, 4]. На дрон можно установить датчик практически любого типа – от самых мощных мультиспектральных камер [5] до самых простых и дешевых сенсоров, имеющих на рынке [6]. Именно возможность использования недорогой аппаратуры и позволило расширить эту технологию.

Первыми из применяемых приборов на БПЛА в этом отношении были камеры, чувствительные к излучениям видимого диапазона (камеры RGB – Red, Green, Blue). Высота полета дронов и возможность получения изображений с большими перекрытиями устранили необходимость в метрических камерах, что значительно снизило стоимость сенсорной аппаратуры. Кроме того, в последнее время стали использоваться недорогие гибридные двойные камеры, способные вести съемку как в видимом, так и в инфракрасном (тепловом) диапазоне.



Рис. 1. Аэрофотоснимок изучаемой территории



Рис. 2. Дрон DJI Mavic Enterprise Dual

Представленная работа сосредоточена на анализе планирования и получения трехмерных моделей с помощью одновременного использования двух таких типов съемки для решения археологических задач. Несмотря на доступную стоимость, двойная съемка указанного типа и обработка полученных материалов требуют определенного методологического подхода, что оправдывает необходимость данного исследования.

Археологическим памятником, выбранным для проверки предложенного метода, является Хулиобрига (рис. 1) – остатки древнеримского города на юге провинции Кантабрия в Испании. Хотя точная дата основания этого города неизвестна, общепринятым считается 15 год до н. э. Процесс его строитель-

ства завершился в I веке н. э., а населен он был до середины III века н. э. [7].

ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ ►

Инструменты ►

В настоящее время существует множество датчиков с широким спектром возможностей, которые можно свести к следующим основным категориям: метрические, RGB (видимого диапазона), тепловизионные и гиперспектральные камеры. Стоимость метрических камер обычно высока, тогда как квазиметрические камеры обычно недороги. Недавно производители начали выпускать двойные камеры, состоящие из неметрического датчика видимого диапазона и термодатчика (инфракрасного). Эти камеры



Рис. 3. Результаты планирования полета и выбора опорных точек

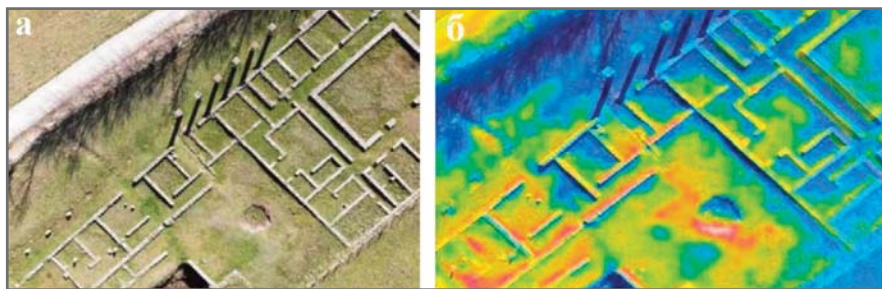


Рис. 4. Изображения, полученные с помощью различных датчиков: а – камеры видимого диапазона (RGB); б – тепловизионной камеры

двойного назначения доступны по цене, но планирование полета для их работы должно быть более тщательным, поскольку они не являются метрическими.

После тщательного изучения имеющихся на рынке БПЛА был выбран квадрокоптер китайского производства DJI Mavic Enterprise Dual (рис. 2). Это компактный дрон, который позволяет измерять значения температуры на исследуемой территории, а также сохранять данные, полученные от RGB и инфракрасного датчиков, для эффективной обработки материалов, анализа и составления отчетов. Этот БПЛА был разработан для профессионального использования и оснащен двумя мощными камерами – тепловизионной и видимого диапазона. Это делает его универсальным инструментом для обследования, обеспечения безопасности, спасательных операций и т. д. Данный аппарат легкий и имеет уменьшенные размеры, что обеспечивает среднюю автономность полета и надежную сенсорную технологию. Он может быть стабильным и точным в полете даже в относительно

неблагоприятных погодных условиях при скорости ветра до 50 км/ч.

Камера RGB, встроенная в дрон Mavic Enterprise Dual, представляет собой камеру видимого диапазона M2ED китайского производства, дающую изображения с разрешением 4К (около 4000 столбцов пикселей). Изображения, снятые M2ED, автоматически сохраняются одновременно с полученными с помощью микротепловизионного модуля FLIR Lepton[®] производства США. (Технические характеристики указанных камер и дрона можно посмотреть в таблицах I–III первоисточника, ссылка на который приведена в конце его сокращенного перевода, или на сайтах производителей. – *Ред.*)

Фотограмметрическое планирование полета ►

После выбора камер полет дрона должен быть спланирован таким образом, чтобы гарантировать получение наиболее подходящей информации для решения задач [8], необходимых для моделирования местности. Ведь недо-

рогие датчики, особенно температурные (обычно с более низкими характеристиками, чем у RGB [10]), требуют гораздо более тщательной отработки технологии работы с точки зрения высоты полета, перекрытий съемки, опорных точек на местности (для которых известны координаты – Ground Control Points, GCP) и т. д. [9].

В связи с этим и с учетом технических характеристик датчиков удобно спроектировать фотограмметрический полет, адаптированный к потребностям сенсора с более плохими характеристиками (температурного). Для быстрого и легкого программирования полета в соответствии с характеристиками камер и нужными характеристиками будущей 3D модели может быть применен ряд программных пакетов, включающих опции с открытым исходным кодом [10]. Перед полетом должны быть предварительно выбраны и обозначены опорные точки на местности, подлежащей облету [11], для чего используются специальные сигналы для автоматического распознавания программным обеспечением.

Результаты планирования полета и распределения опорных точек показаны на рисунке 3. После фотограмметрического полета продукты, полученные с помощью гибридного двойного датчика, представляют собой аэрофотоснимки в видимом и инфракрасном диапазонах (рис. 4).

Следующий шаг на основе полученных изображений осуществляется с использованием соответствующего оборудования и специального программного обеспечения. В этом исследовании применялась программа Metashape Agisoft, разработанная в российской компании Agisoft LLC, хотя существует множество платформ, позволяющих обрабатывать такие данные.

РЕЗУЛЬТАТЫ ►

В результате обработки изображений получают различные побочные продукты. В зависимости от их назначения они могут быть очень полезны при моделировании участка местности.

Сначала получают все побочные продукты, связанные с камерой видимого диапазона, такие как облако точек, каркасная сетка, сплошная сеть триангуляции местности, текстурированная модель, затененная модель и, наконец, ортофотоснимок (цифровое изображение местности, привязанное к системе координат этой местности, масштабу и единицам измерения) (рис. 5–10).



Рис. 5. Облако точек, полученное с помощью камеры видимого диапазона (RGB)

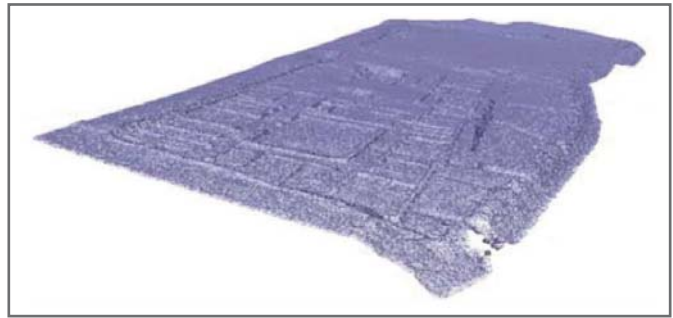


Рис. 6. Каркасная сетка, полученная с помощью камеры видимого диапазона (RGB)

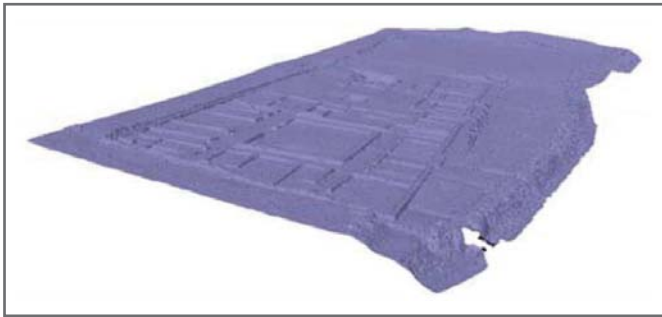


Рис. 7. Сплошная сеть триангуляции местности, полученная с помощью камеры видимого диапазона (RGB)



Рис. 8. Текстурированная модель, полученная с помощью камеры видимого диапазона (RGB)



Рис. 9. Затененная текстурированная модель, полученная с помощью камеры видимого диапазона (RGB)



Рис. 10. Ортофотоснимок

Затем получают все выходные данные, относящиеся к термодатчику. Среди относящихся к ним побочных продуктов – облака точек, каркасная сетка, сплошная сеть триангуляции местности, текстурированная модель и затененная модель (рис. 11–15).

Разумеется, количество полученных результатов подтверждает потенциал этого метода, который еще совсем недавно был немислим, а теперь может быть использован с минимальными усилиями.

ОБСУЖДЕНИЕ ►

После выполненной работы, которая была сосредоточена на методологическом анализе внедрения в археологические исследования информации, полученной с помощью недорогих датчиков, работающих в инфракрасном спектре,

предлагается несколько возможных интерпретаций результатов.

1. Выбор датчика является одним из наиболее важных решений, когда речь идет о получении приемлемых результатов. В настоящее время производители недорогих сенсоров предлагают две возможности. Первый вариант – это использование камеры видимого диапазона (RGB) и тепловизионной камеры. Второй вариант – применение гибридного двойного устройства, включающего оба таких датчика. Второй вариант значительно ограничивает количество доступных устройств. Однако он позволяет избежать второго полета БПЛА и гарантирует, что вся соответствующая двойная информация будет собрана за один полет.

2. Данное исследование не было направлено на нахождение параметров,

определяющих планирование полета. Полеты использованного типа, предназначенные для получения более или менее обычных результатов с точки зрения точности, не требуют специальных инструментов для их планирования. Они могут быть разработаны с применением обычных критериев для таких параметров, как размер пикселя на местности (GSD – Ground Sample Distance), высота полета, величина перекрытий съемки, опорные точки и т. д. В настоящее время для такого планирования существует широкий выбор программного обеспечения с закрытым или открытым исходным кодом. Однако для правильного планирования полета необходимо выбрать технические характеристики наиболее ограниченного по ним датчика.

3. Также необходимо выбрать программное обеспечение, которое будет

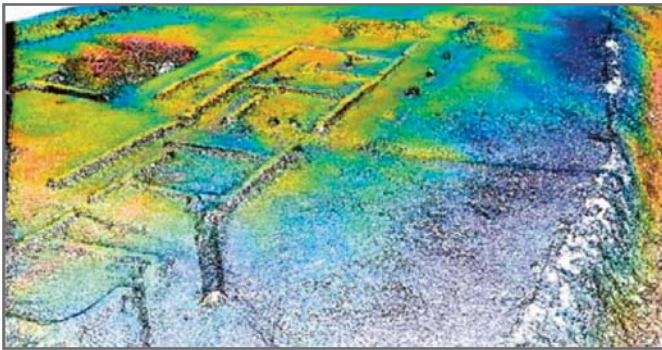


Рис. 11. Облако точек, полученное с помощью тепловизионной камеры



Рис. 12. Каркасная сетка, полученная с помощью тепловизионной камеры



Рис. 13. Сплошная сеть триангуляции местности, полученная с помощью тепловизионной камеры

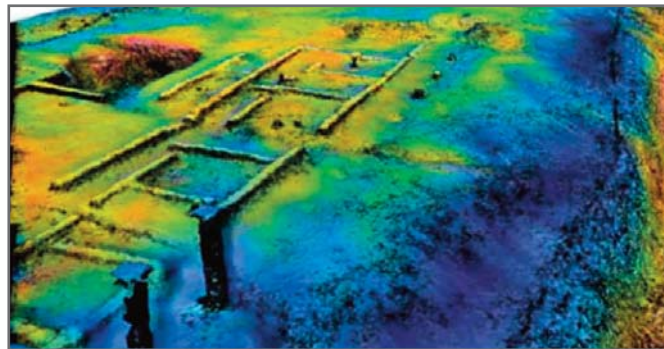


Рис. 14. Затененная модель, полученная с помощью тепловизионной камеры

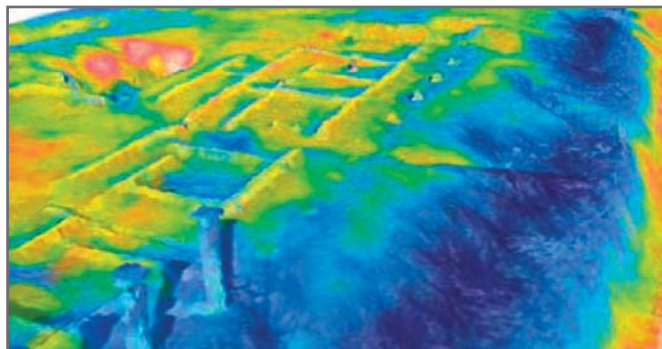


Рис. 15. Текстурированная модель, полученная с помощью тепловизионной камеры

использоваться. Этот выбор могут обуславливать различные факторы. В процессе принятия решений учитываются такие аспекты, как стоимость и имеет ли программное обеспечение открытый или с закрытый исходный код, учитывая что результаты работы в этих программах (облака точек, каркасные сетки, текстурированные модели, ортофотоснимки и пр.) более или менее схожи.

Все эти вопросы и необходимые меры предосторожности поддаются усовершенствованию и призваны помочь будущим исследованиям, направленным на сопоставление моделей, полученных в видимом и инфракрасном диапазонах с помощью недорогих датчиков, установленных на БПЛА.

ВЫВОДЫ ►

Проанализировав полученные результаты применения предложенной технологии исследований, можно сделать следующие выводы.


1. Хотя планирование полета не требует специальных инструментов, в случае использования прикрепленного к дрону рассмотренного гибридного двойного сенсорного устройства технические характеристики камеры видимого диапазона обычно значительно лучше, чем у термодатчика. Это необходимо учитывать при планировании полета, чтобы он соответствовал наиболее ограниченному диапазону технических характеристик, которые обычно относятся к датчику инфракрасного диапа-

зона. В остальном планирование может быть разработано по обычным критериям, таким как размер пикселя на местности (GSD), высота полета, величина перекрытий съемки, опорные точки и т. д.

2. Учитывая результаты, предоставленные программным обеспечением, имеется соответствие между моделями, сгенерированными на основе данных, полученных с помощью датчика видимого диапазона, и моделями, полученными с помощью термодатчика. Использование камер видимого диапазона в настоящее время более распространено и позволяет получать очень достоверные цифровые модели рельефа. Тепловизионные камеры используются менее широко, но могут

предоставить термическую информацию о материалах, образующих земную кору, и, следовательно, внести свой вклад как в исследования и контроль состояния археологически объектов, так и в другие важные сферы инженерных изысканий и прочих наук.

3. Первоначально термический характер археологического объекта не будет достаточно характерным или дифференцирующим, но адекватное сочетание его изучения с анализом ЦМР и материалов, которые имеются на рассматриваемом участке, может

дать положительные результаты. Исследования с помощью тепловизионных камер направлены на получение дополнительной информации для поддержки тех или иных выводов, причем с очень низкими и вполне допустимыми затратами. 

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

De Luis-Ruiz J.M., Sedano-Cibrian J., Perez-Alvarez R., Pereda-Garcia R., Pina-Garcia F. Generation of 3D models obtained with low-cost RGB and thermal sensors mounted on drones // *International Journal of Geological and Environmental Engineering*. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2022. Vol. 16. № 1. URL: publications.waset.org/10012384/generation-of-3d-models-obtained-with-low-cost-rgb-and-thermal-sensors-mounted-on-drones.

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

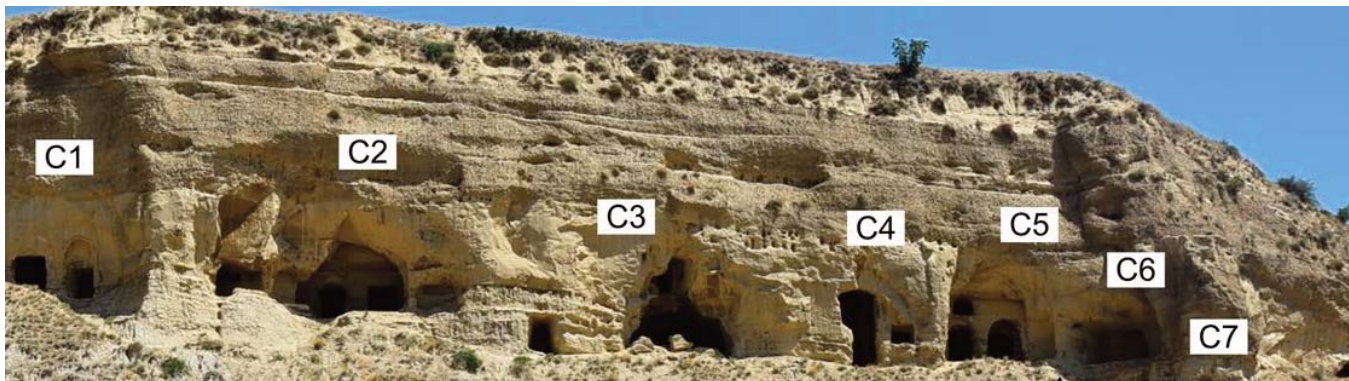
1. Tscharf A., Rimpler M., Fraundorfer F., Mayer G., Bischof H. On the use of UAVs in mining and archaeology-geo-accurate 3D reconstructions using various platforms and terrestrial views // *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. Vol. 2. № 1W1. P. 15–22. URL: doi.org/10.5194/isprsannals-II-1-W1-15-2015.
2. Carrera-Hernández J.J., Levresse G., Lacan P. Is UAV-SfM surveying ready to replace traditional surveying techniques? // *International Journal of Remote Sensing*. 2020. Vol. 41. № 12. P. 4818–4835. URL: doi.org/10.1080/01431161.2020.1727049.
3. Hill A.C. Economical drone mapping for archaeology: comparisons of efficiency and accuracy // *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2019. Vol. 24 (April 2017). P. 80–91. URL: doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.12.011.
4. Nex F., Remondino F. UAV for 3D mapping applications: a review // *Applied Geomatics*. 2014. Vol. 6. № 1. P. 1–15. URL: doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x.
5. Raimundo J., Medina S.L.C., Prieto J.F., de Mata J.A. Super resolution infrared thermal imaging using pansharpening algorithms: quantitative assessment and application to UAV thermal imaging // *Sensors (Switzerland)*. 2021. Vol. 21. № 4. P. 1–18. URL: doi.org/10.3390/s2104126.
6. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. Vol. 92. P. 79–97.
7. Fernandez-Vega P.A., Bolado del Castillo R., Callejo-Gomez J., Mantecon-Callejo L. Un termino augustal del ager Iuliobrigensium // *Archivo Espanol de Arquelogia*. 2012. Vol. 85. P. 267–271.
8. Mesas-Carrascosa F.J., Garcia M.D.N., de Larriva J.E.M., García-Ferrer A. An analysis of the influence of flight parameters in the generation of unmanned aerial vehicle (UAV) orthomosaics to survey archaeological areas // *Sensors (Switzerland)*. 2016. Vol. 1. № 1. URL: doi.org/10.3390/s16111838.
9. De Luis-Ruiz J.M., Sedano-Cibrian J., Pereda-Garcia R., Perez-Alvarez R., Malagon-Picon B. Optimization of photogrammetric flights with UAVs for the metric virtualization of archaeological sites. Application to Juliobriga (Cantabria, Spain) // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. № 3. P. 1204. DOI: [10.3390/app1103120](https://doi.org/10.3390/app1103120).
10. Casana J., Wiewel A., Cool A., Hill A.C., Fisher K.D., Laugier E.J. Archaeological aerial thermography in theory and practice // *Advances in Archaeological Practice*. 2017. Vol. 5. № 4. P. 310–327. URL: doi.org/10.1017/aap.2017.23.
11. Blistan P., Kovanic L., Patera M., Hurcik T. Evaluation quality parameters of DEM generated with low-cost UAV photogrammetry and structure-from-motion (SfM) approach for topographic surveying of small areas // *Acta Montanistica Slovaca*. 2019. Vol. 24. № 3. P. 198–212. URL: [semanticscholar.org/paper/Evaluation-quality-parameters-of-DEM-generated-with-Bli%20Kovani/d0b394b5d8bdd113f2335f15dfaf9fb7b9a4c3c6](https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-quality-parameters-of-DEM-generated-with-Bli%20Kovani/d0b394b5d8bdd113f2335f15dfaf9fb7b9a4c3c6).



Telegram-канал журнала

Независимый электронный журнал
ГеоИнфо

● Новости ● Статьи ● Обсуждения



ТРЕХМЕРНЫЙ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПЕЩЕРНОГО МОНАСТЫРЯ САБЕРЕЕБИ (ГРУЗИЯ).

Часть 1

ДОМЕЙ ГИЗЕЛА (DOMEI GISELA)

Факультет наук о Земле и окружающей среде Миланского университета Бикокка (г. Милан, Италия); факультет гидрогеологии и инженерной геологии, факультет химии и наук о Земле Вильнюсского университета (г. Вильнюс, Литва)
gisela.domej@unimib.it; g.domej@gmail.com

ПРЕВИТАЛИ МАРКО (PREVITALI MARCO)

Факультет естественных наук и инженерии Университета Данди, г. Данди, Великобритания

КАСТЕЛЛАНСА РИККАРДО (CASTELLANZA RICCARDO)

Факультет наук о Земле и окружающей среде Миланского университета Бикокка, г. Милан, Италия

СПИЦЦИКИНО ДАНИЭЛЕ (SPIZZICHINO DANIELE)

Итальянский институт охраны и исследований окружающей среды Геологической службы Италии, г. Рим, Италия

КРОСТА ДЖОВАННИ (CROSTA GIOVANNI)

Факультет наук о Земле и окружающей среде Миланского университета Бикокка, г. Милан, Италия

ВИЛЛА АЛЬБЕРТО (VILLA ALBERTO)

Факультет наук о Земле и окружающей среде Миланского университета Бикокка, г. Милан, Италия

ФУЗИ НИКОЛЕТТА (FUSI NICOLETTA)

Факультет наук о Земле и окружающей среде Миланского университета Бикокка, г. Милан, Италия

ЭЛАШВИЛИ МИХАИЛ (ELASHVILI MIKHEIL)

Факультет естественных наук и инженерии Государственного университета Ильи, г. Тбилиси, Грузия

МАРГОТИНИ КЛАУДИО (MARGOTTINI CLAUDIO)

Кафедра ЮНЕСКО по предотвращению и устойчивому управлению гидрогеологическими рисками Флорентийского университета, г. Флоренция, Италия

Продолжаем знакомить наших читателей с использованием программной продукции южнокорейской компании MIDAS IT, основанной в 2000 году в Сеуле. Программы, разработанные в этой компании, используются в 136 странах мира для моделирования, комплексного проектирования и анализа в области транспортного, геотехнического, промышленного и гражданского строительства и обеспечивают безопасность, эффективность и конкурентоспособность инженерных проектов. В том числе с помощью продуктов MIDAS IT был спроектирован знаменитый небоскреб Бурдж Халифа в Дубае (ОАЭ) и прекрасный трехкилометровый вантовый Русский мост в российском Владивостоке. В 2013 году было открыто российское представительство этой компании – ООО «МИДАС» (midasoft.ru/; geoinfo.ru/brand/midas-it/). На территории РФ сейчас представлено три конечноэлементных расчетных комплекса MIDAS IT, адаптированных для соответствия требованиям российских нормативных документов, – midas GTX NX, midas Civil и midas FEA NX. Программа midas GTX NX предназначена для геотехнических расчетов, моделирования и анализа поведения грунтов и их взаимодействий с инженерными конструкциями.

Сегодня представляем немного сокращенный адаптированный перевод статьи «Трехмерный конечноэлементный анализ устойчивости пещерного монастыря Саберееби (Грузия) с высоким разрешением», которая была опубликована в 2022 году на английском языке в журнале Rock Mechanics and Rock Engineering («Механика горных пород и горное строительство»), выпускаемом международной издательской компанией Springer («Шпрингер»). Авторами указанной работы являются ученые из Италии, Великобритании и Грузии – Гизела Домей, Марко Превитали, Риккардо Кастелланса, Даниэле Спиццикино, Джованни Кроста, Альберто Вилла, Николетта Фузи, Михаил Элашвили и Клаудио Марготтини.

В данной статье оценивается статическая устойчивость пещерного монастыря Саберееби, находящегося к юго-востоку от столицы Грузии Тбилиси. Обрыв (очень крутой склон), в котором были выкопаны эти пещеры с грузинскими православными часовнями, церквями и кельями, сложен пятью слоями слабых осадочных пород, каждый из которых обладает значительным потенциалом разрушения, поэтому перед геологами, инженерами и археологами была поставлена задача сохранения его устойчивости.

Сегодня представляем первую часть переведенной статьи, в которой рассматривается стратегия обработки таких данных, как облака точек, полученных с помощью фотограмметрии с дронов, а также данных, полученных в пещерах и за их пределами с применением лазерных сканеров, с превращением их в объекты систем автоматизированного проектирования (САПР) с высоким разрешением, которые можно использовать для численного моделирования методом конечных элементов в диапазоне от макро- до микромасштабов (в том числе в программе GTS NX от компании MIDAS IT). Полная ссылка на первоисточник приведена в конце перевода.

ВВЕДЕНИЕ ►

Цель монастырей Саберееби представляет собой искусственно вырытый пещерный комплекс (растянувшийся на 5 км. – *Ред.*) в историческом регионе Кахетия на востоке Грузии примерно в 60 км к юго-востоку от столицы страны Тбилиси. Эти пещеры расположены в одном из многочисленных обнажений пород Иорского плоскогорья, возвышающегося на 1000 м над уровнем моря и вытянутого с северо-запада на юго-восток вдоль Иверийской впадины (указанные плоскогорье и впадина протяги-

ваются в восточной части Грузии между Большим и Малым Кавказом. – *Ред.*) (рис. 1).

Иорское плоскогорье имеет холмистый рельеф с антиклинальными холмами и синклиналиными впадинами, а также грядами эрозионно-тектонического происхождения с высотами до 300 м относительно окружающих плоских территорий и протяженностью в несколько километров (рис. 2; Javakhishvili et al., 2019; Tielidze et al., 2019 a, b). Скорость его поднятия оценивается в 2–3 мм/год (Gobejishvili, 2011). Литологические

комплексы имеют пологое падение в северо-восточном направлении и состоят из континентальных и морских песчаников, конгломератов, известняков, мергелей и глин от миоценовых до плейстоценовых. Нередки четвертичные осадочные чехлы в виде аллювиальных, делювиальных и пролювиальных отложений (Gamkrelidze, 1992; Gobejishvili, Tsereteli, 2012; Tielidze et al., 2019 b; Tsereteli, 1964).

Общая морфология бассейнов региона асимметрична в результате образования взбросов с грядами, имеющими

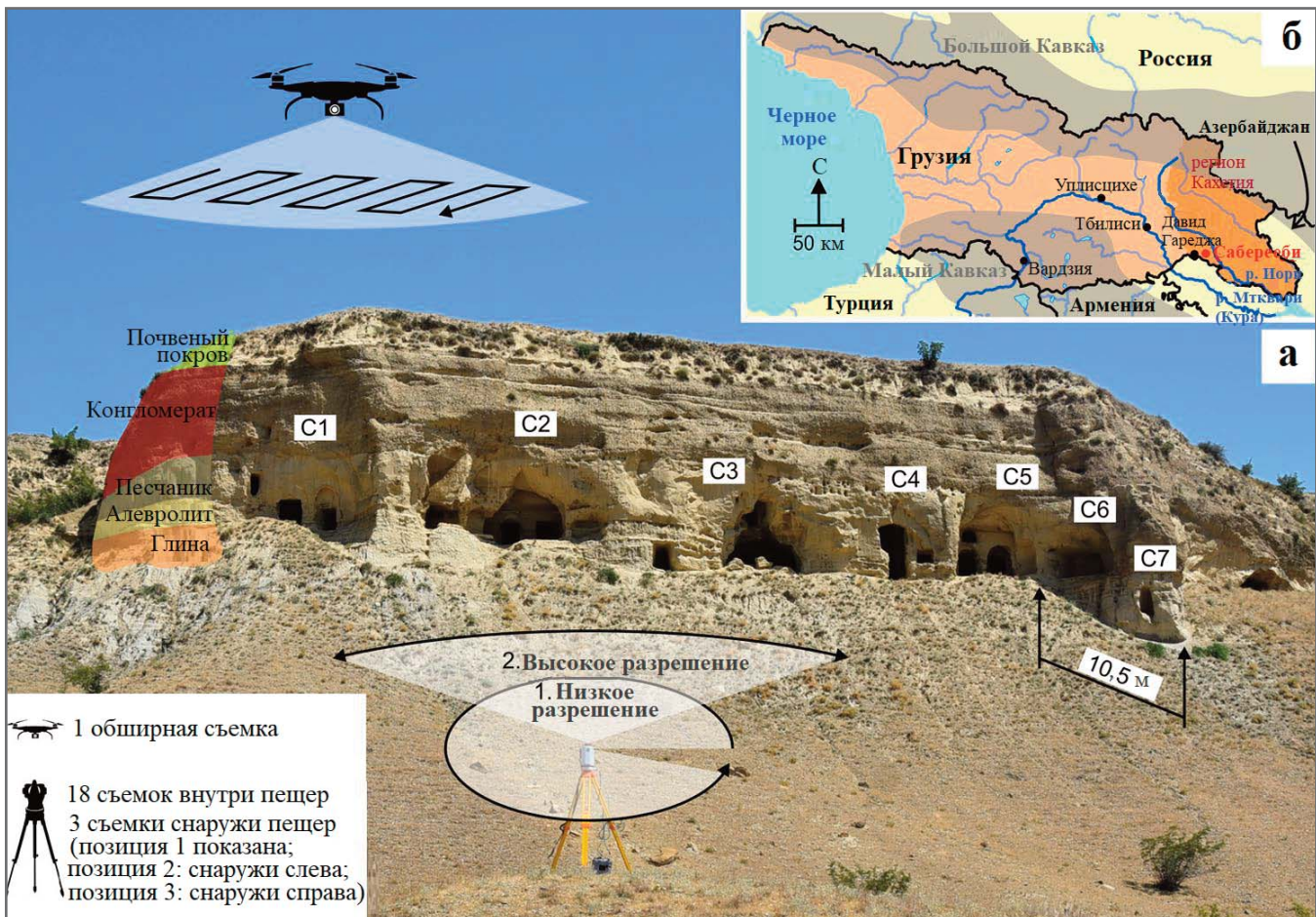


Рис. 1. Исследованная часть цепи монастырей Саберееби из семи исследованных пещер и связанных с ними небольших полостей (а) в историческом регионе Кахетия в Восточной Грузии (изображение карты Грузии (б) не отражает политических взглядов авторов). Все семь пещер со связанными с ними полостями были оценены с помощью дрона снаружи, а также с использованием лазерного сканера, который устанавливался в трех местах снаружи (два из которых находятся за пределами представленного изображения) и в 18 местах внутри пещер. Литологические слои (почвенный покров, конгломерат, песчаник, алевролит и глина) спереди кажутся почти горизонтально залегающими, но в действительности они в среднем имеют азимут падения 34° и падение 7°



Рис. 2. Часть Иорского плоскогорья с холмистым рельефом – с холмами и грядами эрозионно-тектонического происхождения. Исследованный пещерный монастырь Саберееби расположен в обрыве в правом нижнем углу фотографии (снимок был сделан с дрона в 2019 году в направлении примерно на север; масштабные соотношения представлены на рисунке 1, а)

пологие склоны, обращенные на северо-восток, но квазивертикальные обрывы, переходящие в более пологие склоны у подножий, с юго-западной стороны. Последние часто рассечены локальными мелкомасштабными руслами грунтовых и селевых потоков, играющими ключевую роль в эрозионных процессах. В этом отношении видно, что вогнутости на гряде, предрасполагающие к возникновению таких русел, пересекающих обрывистые склоны на юго-западной стороне, часто сопровождаются (если не обусловлены) сетью русел на северо-восточных склонах гряды.

Несмотря на то что Иорийское нагорье дренируется рекой Мтквари (Курой), выполняющей основную дренирующую роль в Куринской впадине, разделяющей Большой и Малый Кавказ и ведущей к Каспийскому морю, и рекой Иори (левым притоком Куры первого порядка), оно характеризуется засушливым и полупустынным степным континентальным климатом от умеренного до теплого, сильными ветрами, большими температурными контрастами, достигающими сезонных различий до 60 °С, и среднесуточными температурами воздуха 10–12 °С (Gagua, Mumladze, 2012; Kordzakhia, 1964; Mumladze, Lomidze, 2012; Tielidze et al., 2019 b, c). Количество осадков там является низким (300–700 мм/год, Gogishvili et al., 2012), что способствует образованию засушливых земель (в том числе, например, покрытых каштановы-

ми почвами, или каштаноземами), соленых озер (местами), сухих ложинок и конусов выноса, которые после редких сильных дождей часто превращаются в промоины, оползни и селевые потоки (Javakhishvili et al., 2019; Tielidze et al., 2019 a, c).

Пещерные монастыри Саберееби Грузинской православной церкви были построены на краю Иорского плоскогорья в XI–XIII веках во времена Грузинского царства (существовавшего в 1008–1490 годы н. э.) как часть столь же известного монастырского комплекса Давид Гареджа, основанного в VI–IX веках на горе Удабно недалеко от границы с Азербайджаном (см. рис. 1, б; Kldiashvili, Skhirtladze, 2010).

Поскольку степи Восточной Грузии преимущественно подвержены денудации и физическому выветриванию (Gobejishvili, Tielidze, 2019), эти гравитационно-эрозионные процессы затрагивают не только ландшафты, но и подземные архитектурные памятники в виде часовен, крестово-купольных церквей, округлых арок и сводов, келий, ниш, галерей, трапезных и других помещений, стены которых украшены фресками, изображающими религиозные сцены. С целью выявления, оценки и разработки мер защиты и восстановления таких геоархеологических памятников была разработана представленная в данной статье стратегия работ от полевых оценок на основе данных высокого разрешения, полученных с помо-

щью лазерных сканеров и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА, дронов), до трехмерного численного моделирования статической устойчивости указанных объектов под действием силы тяжести.

Аналогичные исследования были проведены ранее в пещерном городе *Вардзия* (монастырском комплексе на юге Грузии. – *Ред.*), построенном в XII–XIII веках в обрыве горы Эрүшети на левом берегу Мтквари (Куры) (см. рис. 1, б) и включающем сотни пещер, которые все еще частично заселены и внесены в предварительный список объектов всемирного наследия ЮНЕСКО (UNESCO, 2021). Для обнаружения смещений, трещин и путей дренажа там были использованы неинвазивные методы постоянного и временного мониторинга, такие как интерферометрия с помощью радара с синтезированной апертурой наземного базирования (РСАНБ, GBSAR) (Basilaia et al., 2016; Margottini et al., 2016 a), цифровая ортофотограмметрия ближнего действия (Frodella et al., 2020; Kirtkitadze et al., 2015, 2016; Spizzichino et al., 2017), применение дифференциальной глобальной системы позиционирования (DGPS) (Okrostsvavidze et al., 2016), 3D наземное лазерное сканирование (НЛС, TLS; Margottini et al., 2015 б, 2016 а, 2017) и инфракрасная термография (Frodella et al. 2020; Spizzichino et al. 2017). Кроме того, были установлены различные стационарные системы для оценки местных метеорологических условий, микроклимата, микросейсмиков и сейсмического шума (Elashvili, et al., 2015; Basilaia et al., 2016), поскольку соответствующий регион сейсмически активен. В 1283 году во время землетрясения в регионе Самцхе ($M_s \approx 7,0$) в Вардзии обрушилось около двух третей обрыва с пещерами. Потом происходили и дальнейшие серьезные повреждения пещер и обрыва, вызванные сильными землетрясениями (Godoladze et al., 2016; Korzhenkov et al., 2017). Для этих объектов были проведены геомеханические испытания, анализ отдельных блоков и локальных разрушений, оценка оползневых рисков (Boldini et al., 2018; Margottini et al., 2012, 2015 а, 2016 б; Spizzichino et al., 2017). С помощью картографического подхода были оценены опасности камнепадов (Margottini et al., 2016 c).

Несмотря на различные методы высокого разрешения, применимые к таким геоархеологическим объектам, ни один из них, однако, не привел к соз-

данию полной трехмерной численной геотехнической модели. Этот недостаток был преодолен в процессе представленной здесь работы с помощью многоэтапной стратегии, охватившей весь диапазон исследований – от 3D измерений облака точек до создания исчерпывающей модели методом конечных элементов (МКЭ, FEM). Для применения этой стратегии в качестве примера был выбран *пещерный монастырь Саберееби*, поскольку для него, с одной стороны, требовалась детальная геотехническая оценка для последующего обеспечения сохранности, а с другой стороны, он имел приемлемый размер структур, представляющих интерес с точки зрения численного моделирования. Следует отметить, что полученный в процессе этого исследования результат является пилотной схемой, которая в будущем может быть адаптирована и использована для разных других объектов, например для пещерного города Вардзия или пещерных комплексов Уплисхихе и Давид Гареджа (см. рис. 1, б), поскольку в целом геотехническая проблема и желаемый тип информации на выходе остались бы прежними.

ДААННЫЕ ►

Необработанные цифровые данные состояли в основном из облаков точек высокого разрешения, полученных с помощью наземного 3D лазерного сканера RIEGL© VZ-1000 в июле 2019 года. Были сделаны снимки с 21 станции (из которых три были расположены снаружи от обрыва и 18 – внутри семи исследованных пещер и связанных с ними небольших подземных помещений, см. рис. 1, а), чтобы запечатлеть максимум искусственно вырытых в грунтовом массиве полостей.

На каждой из 3 станций снаружи от обрыва было проведено по 2 серии сканирования с использованием одной и той же вертикальной оси:

1) с общим поворотом на 360° вокруг вертикальной оси лазерного сканера при низком разрешении ($0,02^\circ$ по горизонтали и $0,02^\circ$ по вертикали);

2) с охватом сегмента поворота, сфокусированного на панораме обрыва при высоком разрешении ($0,01^\circ$ по горизонтали и $0,009^\circ$ по вертикали).

Внутри пещер и связанных с ними небольших полостей было достаточно только полных поворотов при низком разрешении, чтобы оценить размеры этих пустот.

Для сведения к минимуму разницы между облаками точек из разных сканов

(для реконструкции поверхностей) использовался итеративный алгоритм ближайших точек (Iterative Closest Point method, ICP; Besl, McKay, 1992), реализованный в собственной программе RiSCAN PRO лазерного сканера RIEGL© VZ-1000. Впоследствии при обработке трехмерных облаков точек данные структурировались при помощи октодеревя, имевшего 21 уровень, в программе CloudCompare (CloudCompare, 2022). (Октодеревя – трехмерный аналог двумерного квадродеревя. Это древовидная иерархическая структура данных, которая в каждом внутреннем узле имеет ровно восемь «потомков» и последовательно делит трехмерное пространство рекурсивным дроблением на восемь ячеек, то есть каждый узел делит пространство на восемь новых октантов до заданного уровня. Применяется при обработке трехмерных данных, например облаков точек, для их сжатия, ускорения процедур выборки и сохранения без потери точности. Позволяет загружать в оперативную память ограниченный набор точек, а не все облако точек. – *Ред.*).

Это выполнялось для упрощения и обеспечения однородности совокупности всех отдельных сканов с точки зрения точного положения во Всемирной геодезической системе координат 1984 года (World Geodetic System 1984, WGS 84) и в зоне 38 N сетки координат в универсальной поперечной проекции Меркатора (Universal Transverse Mercator, UTM).

Наклоненная назад поверхность обрыва и его бровка (см. рис. 2) были оценены в ноябре 2019 года с помощью ортомозаичной фотограмметрии с дрона DJI© Mavic 2 Pro, оснащенного камерой HASSELBLAD© L1D-20c (см. рис. 1, а). Всего для исследуемой площади около $180\,000\text{ м}^2$ было сделано 243 снимка с приблизительными перекрытиями на 70–80%, что обеспечило правильное построение цифровой модели местности (ЦММ) с помощью программы Agisoft Metashape (Agisoft LLC, 2021). Ориентация обеспечивалась по контрольным точкам, которые можно было повторно идентифицировать на фотографиях, в сочетании с использованием дифференциальной глобальной системы позиционирования (DGPS) и системы непрерывно действующих опорных станций этой системы (Continuously Operating Reference Stations, CORS), что позволяло достигать субсантиметрового разрешения в горизонтальных координатах. Полученная ЦММ была скорректирована для гео-

графической привязки, используемой для данных лазерного сканера.

Кроме того, для отслеживания повреждений пещерного комплекса во времени использовались несколько серий фотоматериалов 2018, 2019 и 2020 годов. Пробы грунтов отбирались исключительно из обломков, упавших рядом с пещерами, поскольку активно извлекать образцы из геотехнических памятников не рекомендуется.

МЕТОДОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И СОЗДАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ►

Как уже упоминалось, представленная работа проводилась в связи с необходимостью всесторонней оценки статической устойчивости пещерного монастыря Саберееби. Но одновременно в ее процессе была разработана новая стратегия создания численных 3D моделей по облакам точек. Поэтому в этом разделе особое внимание будет уделено использованному методологическому подходу к обработке полученных данных для создания на их основе конечноэлементных моделей различных типов.

Генерация сетки на основе данных, полученных с помощью лазерного сканера и дрона ►

Первая основная часть цифровой обработки данных была нацелена на отдельные облака точек, полученные с использованием лазерного сканера в разных местах внутри семи пещер.

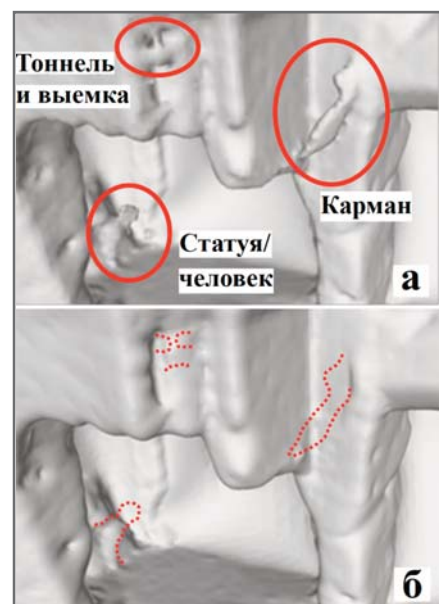


Рис. 3. Элементы сеточной модели поверхности внутри пещеры № 1 до (а) и после (б) применения конвейерного алгоритма морфологической фильтрации (Fisher et al., 1997) в программе Houdini (масштабные соотношения представлены на рисунке 4)

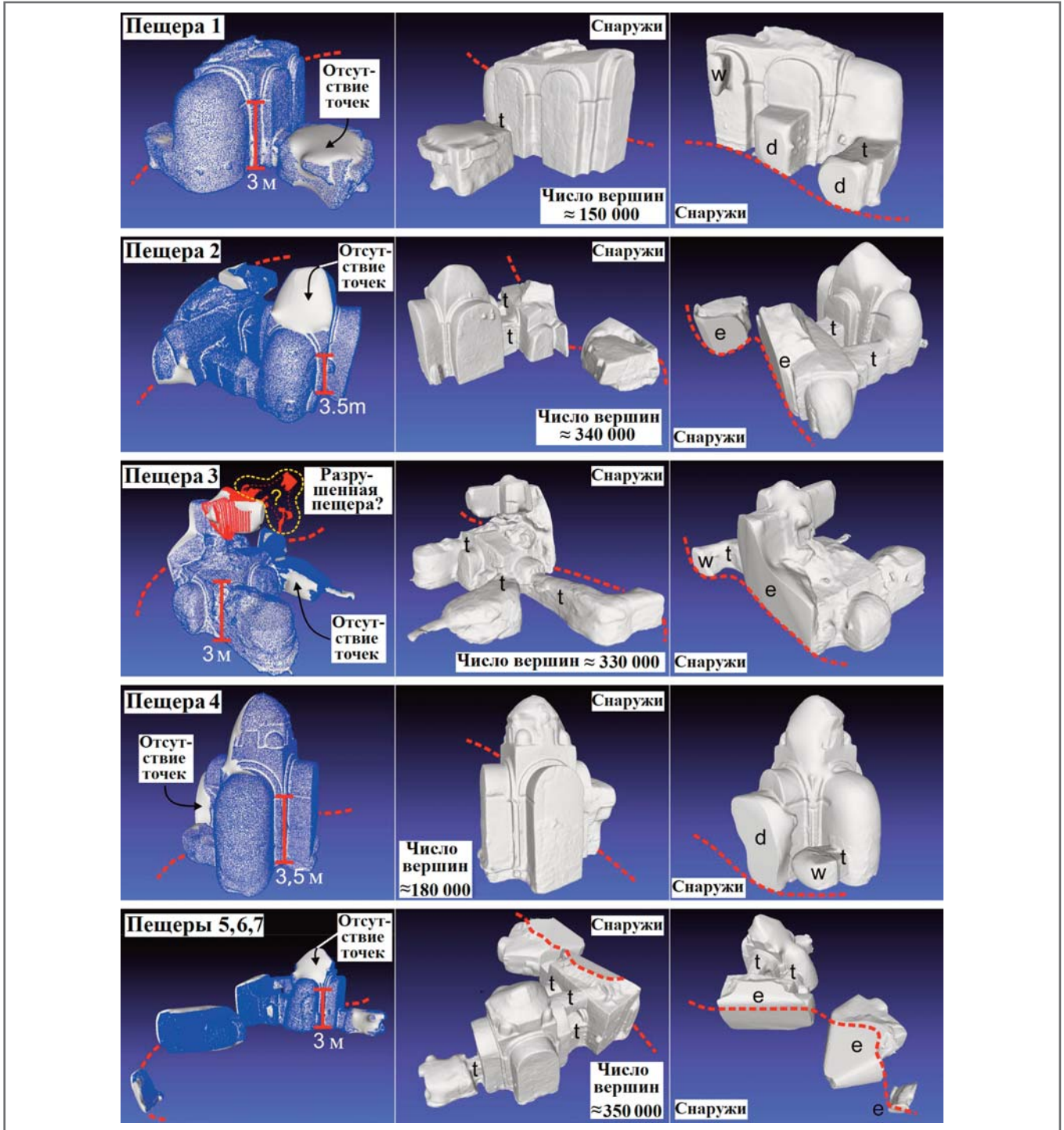


Рис. 4. Замкнутые сетчатые оболочки для всех пещер, полученные из «очищенных» и подвергнутых повторной выборке облаков точек. На первом из трех рисунков для каждой пещеры (первом в каждом горизонтальном ряду из трех рисунков) отражено использованное облако точек (изображенных синим цветом) и показаны зоны отсутствия точек, которые были «заполнены» с помощью метода, основанного на применении экранированного уравнения Пуассона (Kazhdan, Hoppe, 2013). На остальных двух рисунках в каждом ряду представлены очертания соответствующей пещеры со стороны внутренней части обрыва и с его наружной стороны (изображения экспортированы из программы MeshLab). Приблизительное количество вершин для создания сеточных оболочек пещер указано на вторых рисунках каждого триплета. Одна дополнительная полость в пещере 3 была слишком слабо покрыта облаком точек, чтобы по ней можно было создать объемное изображение оболочки, поэтому некоторые из имевшихся изначально желтые стриховой линией) были удалены из набора данных. Буквенные обозначения: d – дверь; e – большой вход; t – тоннель; w – окно

Прежде всего облака точек для отдельных пещер и связанных с ними небольших полостей были «очищены» в программе MeshLab от артефактов (выбросов, в основном вызванных ошибками при сборе данных) без наруше-

ния высокого уровня детализации, а затем подвергнуты повторной дискретизации для регулировки уровня разрешения и уменьшения шума путем выборки на основе диска Пуассона (Corsini et al., 2012).

Важным шагом для (повторного) построения поверхностной сетки, соединяющей зоны отсутствия точек, является вычисление поля предпочтительно однонаправленных нормальных векторов (направленных либо наружу, либо внутрь

пещеры к ее центру), которое также было выполнено в программе MeshLab перед созданием предварительной сетки с помощью метода, основанного на применении экранированного уравнения Пуассона (Kazhdan, Hoppe, 2013).

Из-за значительной ручной «очистки снаружи через стены пещеры» предварительные сетки все еще содержали различные типы артефактов, которые проявлялись в виде каплевидных выемок, карманов или тоннелей (рис. 3, а). Чтобы обойти это, авторы разработали конвейерный алгоритм морфологической фильтрации (Fisher et al., 1997) в программе Houdini, который основан на удалении топологических ошибок и артефактов, заполнении пустых мест, повторном проецировании для восстановления деталей, повторном построении сетки с буферной выпуклой оболочкой и изъятия (вырезания) из главного объекта артефактов с помощью булевой операции (Boolean Subtraction, рис. 3, б). Подробное описание этой процедуры было дано Домеєм и Плутой (Domej, Pluta, 2020).

Последний шаг состоял из вычисления и построения поверхностей в программе Design X от компании Geomagic с использованием неоднородных рациональных базисных сплайнов (Non-Uniform Rational Basis-Splines, NURBS) с охватом отдельных пещер. Затем последние были экспортированы в файлы формата STP (точнее, STEP – стандарта обмена данными моделей продуктов – Standard for the Exchange of Product Data) для получения полных замкнутых объемов пещер (рис. 4).

Для пояснения следует отметить, что обработка цифровых данных началась с такого количества отдельных облаков точек пещер и связанных с ними небольших полостей, сколько было станций лазерного сканирования внутри пещер. В ходе обработки данных они были постепенно объединены в 7 пещер с отдельными входами (см. рис. 1, а).

Вторая значительная часть обработки цифровых данных касалась унифицированных облаков точек, полученных с использованием дрона и с помощью лазерного сканера с трех станций за пределами пещер. Здесь первым шагом было автоматическое удаление некоторых элементов с высокой шероховатостью, например таких как кусты, искусственные сооружения, машины или даже люди, чтобы избежать образования артефактных острых выступов, острых или загнутых краев, самопересе-

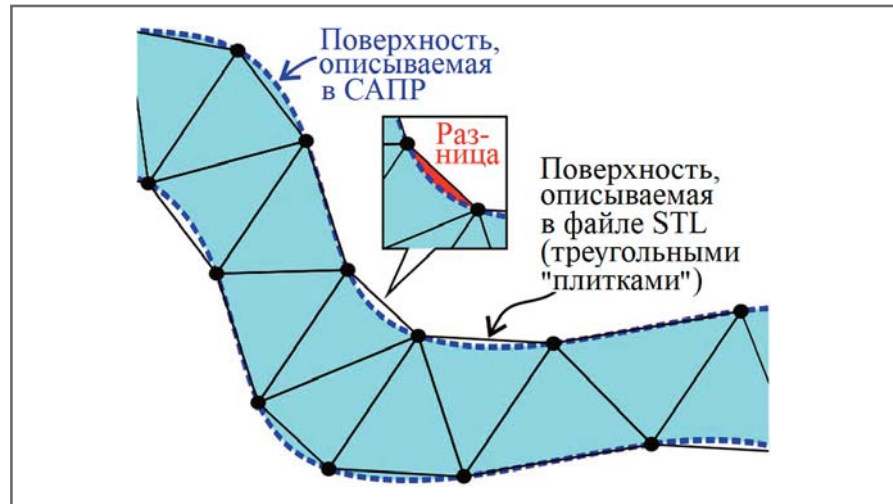


Рис. 5. Разница (выделена красным цветом) между поверхностями, описываемыми в САПР и в файле формата STL

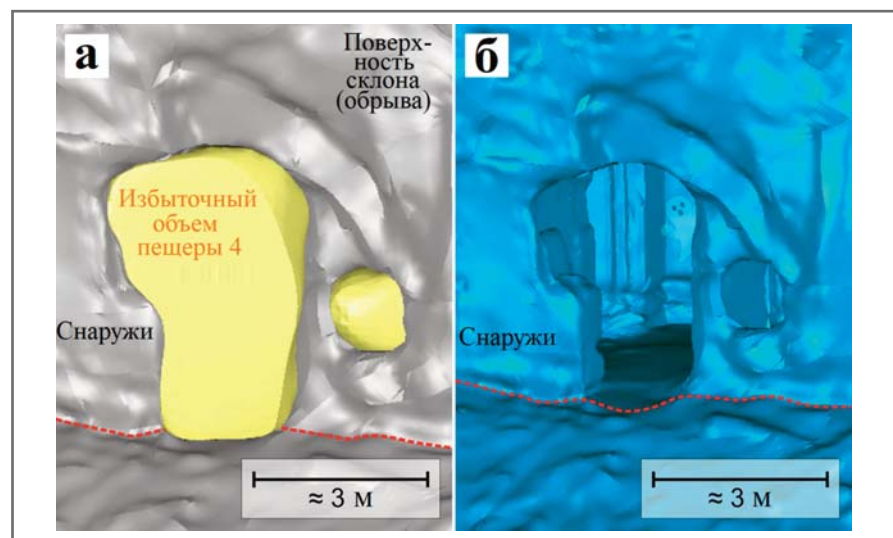


Рис. 6. Избыточный объем пещеры 4, выходящий через дверь и окно на поверхность склона (обрыва) (а) и результат совмещения обоих объектов САПР (б) в виде поверхностей, сгенерированных с помощью неоднородных рациональных базисных сплайнов (NURBS) (изображения, экспортированные из программы Geomagic Wrap)

ний и т. д. и/или неравнообразной геометрии в процессе построения сетки (Leong et al., 1996). Точки, относящиеся к таким элементам, удалялись с помощью анализа методом главных компонент (Principal Component Analysis, PCA; Martinez, Kak, 2001) в различных масштабах для машинного обучения методом опорных векторов (Support Vector Machine, SVM; Cortes, Vapnik, 1995), реализованным в дополнительном модуле CANUPO Suite (Brodu, Lague, 2012) программы CloudCompare. Полученное «очищенное» облако точек затем преобразовывалось в согласованную полигональную модель (сетку) в программе MeshLab с помощью алгоритма «катящегося шарика» (Ball Pivoting Algorithm, BPA, Bernardini et al., 1999). Искусственно созданные несо-

гласия и вытянутые элементы можно было вручную удалить из сетки с помощью программы Blender. В конце концов сетка экспортировалась в файл формата STL (Standard Triangle Language; рис. 5), использующего серию треугольников для представления поверхностей 3D модели, с помощью программы GeoMagic Wrap, чтобы получить согласованную поверхность, представляющую топографию склона.

На этом этапе ранее созданные отдельные файлы STP, описывающие пещеры, были объединены с моделью поверхности склона с помощью операции «булево сложение» (Boolean Addition), то есть путем преобразования автономных замкнутых объемов пещер в открытые вогнутые части поверхности склона. После импорта в программу Geoma-

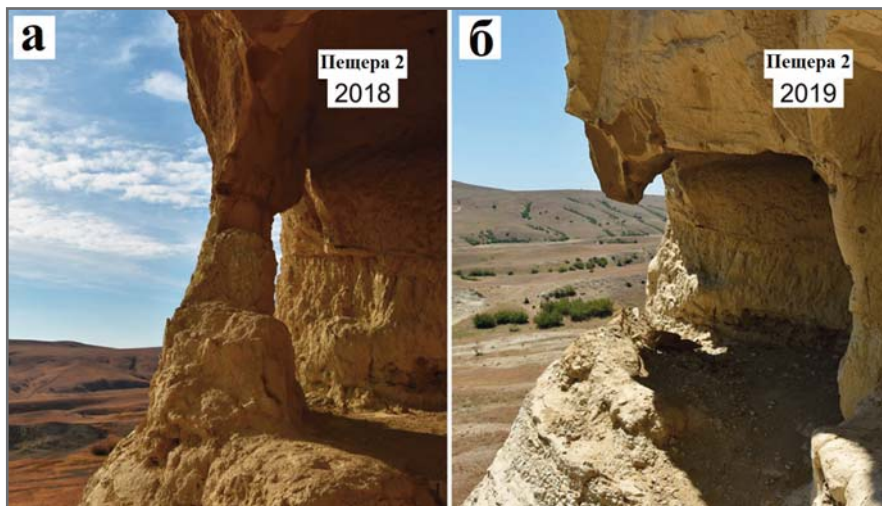


Рис. 7. Опорная колонна высотой около 1 м у входа в пещеру 2, еще стоявшая в 2018 году (а) и уже отсутствовавшая в 2019 году после обрушения (б)



Рис. 8. Упавшие крупные обломки (средний – около 0,5 м) у входа в пещеру 3. Снимок был сделан во время съемки с дрона в 2019 году



Рис. 9. Трещиноватый выступ с двумя параллельными поверхностями обрыва трещинами, коричневатая выветрелая часть которого имеет высоту около 2 м, рядом с входом в пещеру 6. Снимок был сделан во время полевых исследований в 2019 году

gic Wrap оба типа объектов – поверхность склона и «оболочки» пещер – стали выглядеть как триангулированные поверхности (рис. 6, а) с выходом избыточных объемов пещер через отверстия в поверхности склона. Пересечения между поверхностью склона и «оболочками» пещер были выполнены путем ручного выбора ребер, которые являлись общими для обеих геометрий, и удаления избыточных объемов для каждой пещеры (рис. 6, б).

На заключительном этапе комбинированный объект САПР был преобразован из триангулированной поверхности в сумму поверхностей, сгенерированных с помощью неоднородных рациональных базисных сплайнов (NURBS) предложенным Эдельсбрун-

нером методом «обертывания конечных множеств в пространстве», (Edelsbrunner, 2003) в программе Geomagic Wrap, и экспортирован как единый сплошной объект, читаемый в программе GTS NX от компании MIDAS IT (программе midas GTS NX).

Оценка фотоматериалов ►

Пещерные монастыри Сабереэби повторно регулярно посещались с 2011 года, и структурные изменения в их наружных и внутренних частях, а также местная оползневая активность были задокументированы в виде фотографий. Поскольку целью данного исследования была численная модель, отражающая физическое состояние обрыва на момент получения данных с помощью ла-

зерного сканера и дрона, авторы сосредоточились на сериях фотографий и отдельных снимках с дрона, сделанных незадолго до и во время полевых исследований 2019 года для выявления текущих повреждений и находящихся в опасности объектов, которые либо недавно обрушились, либо могут обрушиться в ближайшем будущем.

Одной из трех наиболее заметных особенностей была рухнувшая опорная колонна высотой около 1 м у входа в пещеру 2, которая до ноября 2018 года еще стояла, но в 2019 году уже не была обнаружена (рис. 7; NACHPG, 2019). Кроме того, у входа в пещеру 3 лежало несколько крупных упавших обломков диаметром от 0,5 до 1 м (рис. 8), которые ранее были частью пола небольшой полости над крупным входом в пещеру 3.

Трещиноватый выступ грунта рядом с входом в пещеру 6 и чуть выше пещеры 7 не являлся непосредственной частью какой-либо искусственной полости, но представлял угрозу по крайней мере для двух пещер (рис. 9). Коричневатая часть его, имевшая высоту более 2 м, и трещины, параллельные поверхности обрыва, указывали на то, что обрушение неизбежно.

Лабораторные испытания образцов грунта ►

Были выполнены две серии лабораторных геотехнических испытаний образцов из слоев песчаника и алевролита, которые представляли особый интерес. Сверху вниз на слой песчаника приходится примерно две трети объемов исследованных пещер, а на слой алевролита – нижняя их треть (см. рис. 1, а).

Сначала Бергамини (Bergamini, 2020) провел классические исследования, касающиеся механики грунтов: изучение гранулометрического состава при помощи лазерного анализатора (рис. 10, а); ртутную порометрию (Abell et al., 1999; рис. 10, б); испытания на прочность при одноосном сжатии (рис. 11) как образцов в их первоначальной форме, так и после их обработки нанокремнеземом, что могло бы сыграть определенную роль во время будущего укрепления пещер и обрыва; анализ с помощью микрокомпьютерной томографии (микро-КТ; рис. 12). Кроме того, на геохимический состав и структурные связи между зернами грунта пролили свет исследования с помощью рентгенодифракционного и рентгенофлуоресцентного анализа (таблицы 1, 2), что также могло бы послужить для будущих исследований, связанных с

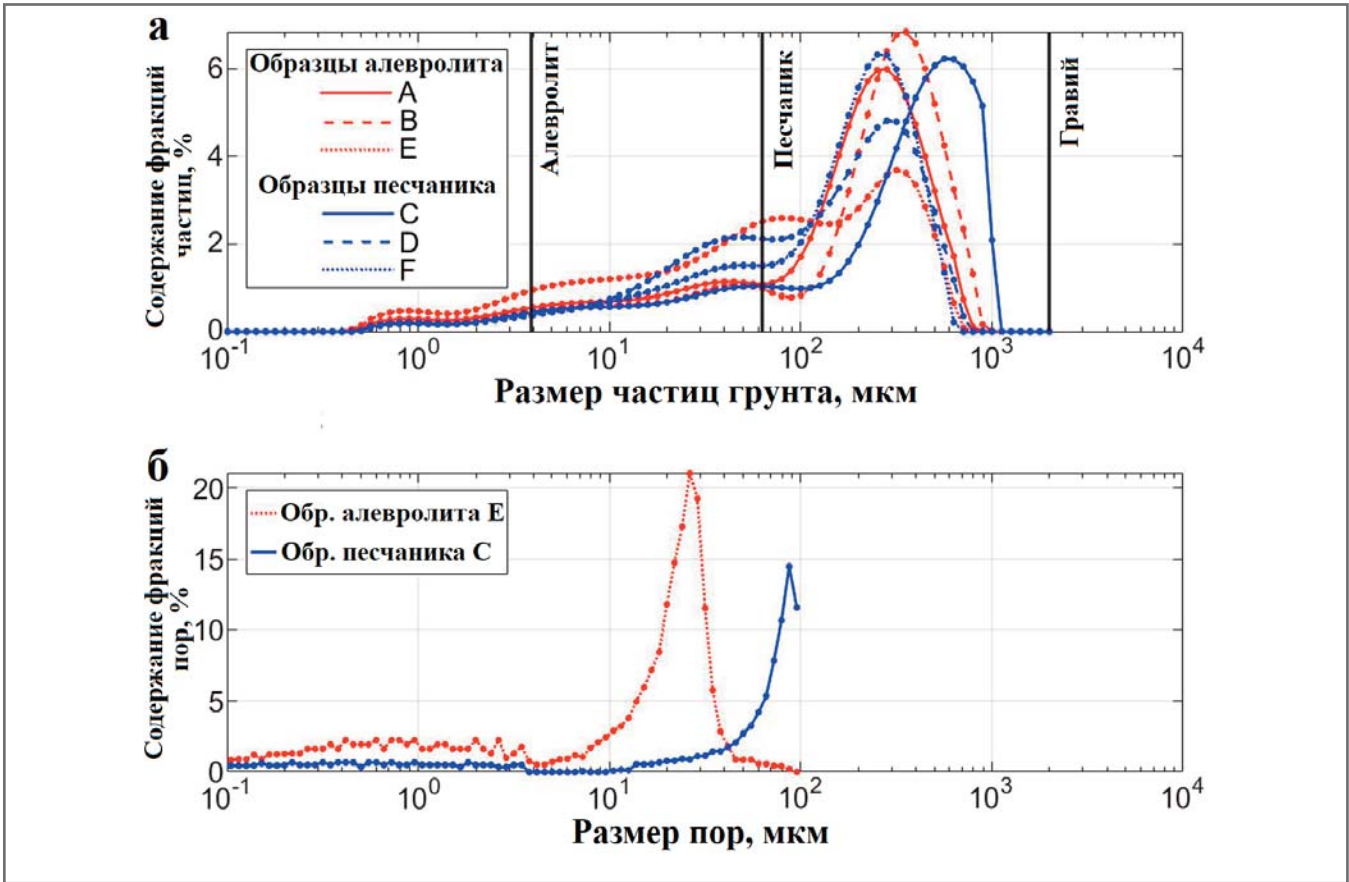


Рис. 10. Распределение размеров частиц (а) и пор (б) в образцах грунтов, отобранных во время полевых исследований 2019 года. Образцы, первоначально идентифицированные как алевролит (А, В, Е), по размеру частиц соответствуют песчаннику. Диаметры пор измерялись только до 100 мкм из-за инструментальных ограничений

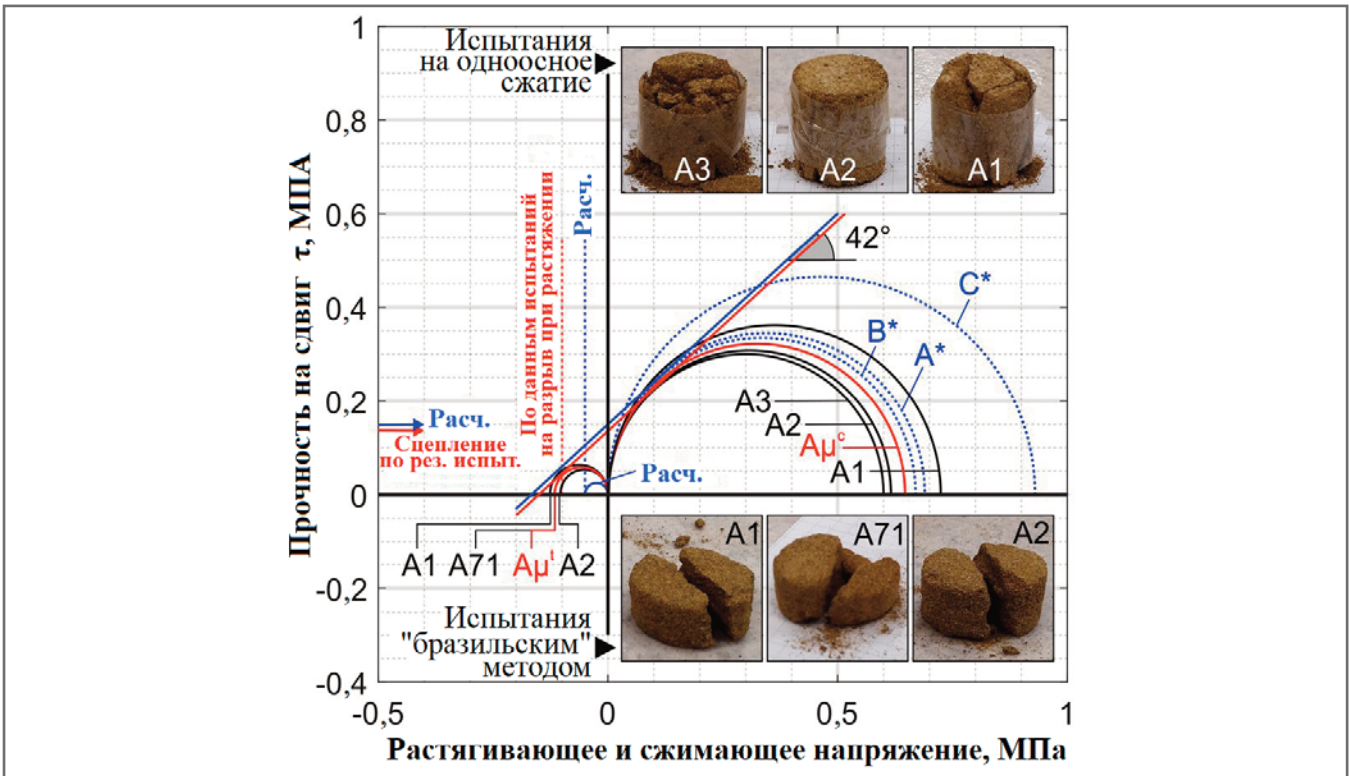


Рис. 11. Результаты испытаний на прочность при одноосном сжатии (А1, А2, А3 и их среднее значение $A_{\mu c}$) и испытаний «бразильским» методом (А1, А2, А71 и их среднее значение $A_{\mu t}$). Результаты корректировались в соответствии с изменением формы образца (Obert et al., 1960). Круги, показанные синими пунктирными линиями (А*, В*, С*), относятся к трем репрезентативным результатам, полученным Бергамини (Bergamini, 2020). Удельное сцепление и угол внутреннего трения для песчанника и алевролита в моделях были приняты равными соответственно 150 кПа и 42° в качестве компромисса между данными Бергамини (Bergamini, 2020) и результатами настоящего исследования. Расчетный предел прочности на разрыв при растяжении 50 кПа отражает общую высокую степень трещиноватости грунта. Все изображенные образцы имеют диаметр около 3 см

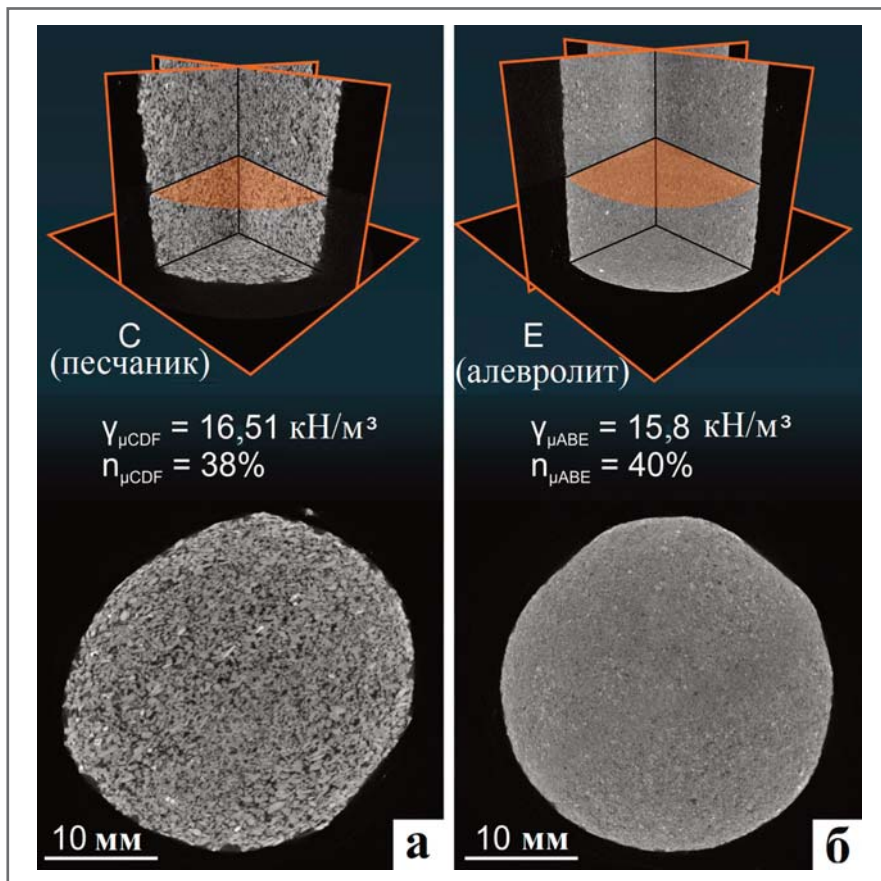


Рис. 12. Результаты анализа образцов песчаника (а) и алевролита (б) с помощью микрокомпьютерной томографии (микро-КТ) в виде пересечений срезов и горизонтальных поперечных сечений (изображения, экспортированные из программы Avizo). Пористость образцов песчаника (С, D, F) в среднем составляет 38%, алевролита (А, В, Е) – 40% (Bergamini, 2020). Пористость образцов, исследованных в представленной работе (образцов для одноосных испытаний на сжатие А1, А2, А3 и образцов для испытаний «бразильским» методом А1, А2, А71), в среднем достигает 43%. Все оценки пористости были основаны на эталонной плотности грунта 2700 кг/м³

Таблица 1. Результаты рентгенодифракционного анализа образцов грунта (Bergamini, 2020)

Группа частиц грунта	Алевролит			Песчаник		
	А	В	Е	С	Д	F
Кварц	> 30%	> 30%	> 30%	> 50%	> 30%	> 50%
Кальцит	> 20%	> 20%	> 20%	-	-	-
Мусковит	5–10%	5–10%	5–10%	> 20%	-	-
Глина	0–5%	0–5%	0–5%	0–5%	5–10%	-
Плагиоклаз	5–10%	5–10%	5–10%	10–15%	> 20%	> 20%
Калиевый полевой шпат	-	-	-	-	-	5–10%
Цеолит	-	-	-	-	> 20%	0–5%
Амфибол	-	-	-	-	0–5%	-

Примечание: "-" — отсутствует

аспектами фильтрации влаги и водонасыщения грунтов обрыва. Однако представленная здесь работа фокусировалась на неводонасыщенных условиях, и в таблице 3 оцененные параметры приведены для сухих грунтов с остаточной влажностью и для предельных условий. После гранулометрического анали-

за образцов алевролита (А, В, Е) и песчаника (С, Д, F) оказалось, что пробы, которые первоначально во время полевых исследований 2019 года были идентифицированы как алевролит, являются песчаником. Соответственно, авторы приняли, что геотехнические параметры слоев песчаника и алевролита очень

похожи, хотя визуально сохраняется явная разница между их слоями на обрыве (см. рис. 1, а).

Вторая серия лабораторных геотехнических исследований (см. рис. 11) состояла из трех испытаний на одноосное сжатие образцов, не обработанных нанокремнеземом, в сухих условиях (А1, А2, А3) и трех испытаний «бразильским» методом в тех же условиях (А1, А2, А71).

Чтобы найти компромисс между данными Бергамини (Bergamini, 2020) и результатами этого исследования, авторы во всех моделях приняли для песчаника и алевролита значения 150 кПа для удельного сцепления и 42° для угла внутреннего трения. Расчетный предел прочности на разрыв при растяжении 50 кПа отражал общую высокую степень трещиноватости исследованных грунтов. Значения удельного веса песчаника и алевролита во всех конечно-элементных моделях соответствовали приведенным Бергамини (Bergamini, 2020; см. рис. 12 и таблицу 1), хорошо согласуясь со средним значением 15,0 кН/м³, полученным в результате геотехнических испытаний в этом исследовании (для образцов А1, А2, А3, испытанных на одноосное сжатие, и образцов А1, А2, А71, испытанных «бразильским» методом, см. рис. 11).

Поскольку образцы слоев почвы, конгломерата и глины не отбирались, подходящие значения для сухих с остаточной влажностью и предельных условий были оценены на основе литературных данных для сопоставимых геологических и геоклиматических условий (Gasbarrone, 2005; Margottini, Spizzichino, 2020; Shafiei, Dusseault, 2008).

Следует отметить, что перечисленные значения для каждого параметра в большинстве случаев относятся к неким диапазонам, а также являются разными для предельных и остаточных условий. Из-за потребности в единых значениях для численных моделей и на основе опыта авторы для каждого параметра для каждого слоя выбрали репрезентативное значение (эти величины выделены курсивом в таблице 1).

Модели для исследованного пещерного монастыря Сабереэби ►

Обобщив всю геометрическую, геологическую и геотехническую информацию, авторы создали несколько серий конечно-элементных моделей в программе midas GTS NX для изучения статического поведения изученного обрыва только под действием силы тяжести, то есть в нево-

донасыщенных условиях. Модели охватывали либо весь обрыв, либо отдельные пещеры в виде так называемых блочных моделей (box models). Поскольку пещеры 5, 6 и 7 расположены близко друг к другу, они были представлены только одной моделью (рис. 13). Все модели всех серий имели общую ориентацию, в которой ось Y направлена на север, жесткие границы находятся внизу, а боковые границы зафиксированы горизонтально (то есть в направлениях осей X и Y , а компонента z меняется, см. рис. 13).

Кроме того, во всех моделях присутствовала такая последовательность литологических слоев (сверху вниз), как «почва, конгломерат, песчаник, алевролит, глина», хотя и в разных долях рассматриваемого общего объема. Поскольку структурно-геологических данных об обрыве и слагающем его массиве грунта было очень мало, авторы решили несколько классических «трехточечных» задач (по поиску четвертой точки) (Davis et al., 2011) по доступным в трехмерной геометрии координатам, которые соответствовали плоскостям напластования. В среднем азимут падения и падение слоев оказались равными соответственно 34° и 7° , что хорошо соответствовало результатам полевых измерений. Поскольку в действительности

Таблица 2. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа образцов грунта (Bergamini, 2020)

Оксид	Алевролит			Песчаник		
	A	B	E	C	D	F
Na ₂ O	0,41%	0,47%	0,69%	0,78%	1,88%	1,61%
MgO	1,34%	1,34%	1,56%	1,92%	2,89%	0,60%
Al ₂ O ₃	11,59%	11,36%	13,57%	16,76%	15,26%	10,43%
SiO ₂	45,86%	48,20%	50,36%	63,86%	59,36%	79,79%
P ₂ O ₅	0,11%	0,10%	0,19%	0,14%	0,13%	0,04%
SO ₃	0,00%	0,00%	0,08%	0,11%	0,00%	0,02%
K ₂ O	1,50%	1,46%	1,97%	2,59%	1,74%	0,01%
CaO	16,66%	15,48%	12,24%	0,55%	4,04%	4,24%
TiO ₂	0,63%	0,54%	0,66%	0,70%	0,66%	1,03%
MnO	0,69%	0,64%	0,10%	0,11%	0,10%	0,01%
Fe ₂ O ₃	6,03%	6,48%	5,24%	8,32%	5,86%	1,00%
Утерянный или испорченный материал	14,89%	13,67%	13,09%	3,87%	7,67%	0,86%

сти слои выглядели почти идеально параллельными друг другу, плоскости напластования в моделях были приняты такими же (см. рис. 13).

В процессе представленной здесь работы авторы рассматривали несколько отдельных серий моделей, чтобы учесть разные геомеханические сценарии и задачи исследований (таблица 4). Различия между сериями моделей были связаны с их размерами и заданными ти-

пами поведения (характеристиками) материалов. Всего было создано пять серий, из которых вторая и третья оценивались вместе в силу их сходства.

Все созданные модели были континуальными (сплошной среды), так как подробную кинематическую оценку систем трещин на исследуемом участке только начали проводить и исчерпывающие данные о трещинах ожидаются лишь для последующего исследования.

Таблица 3. Геотехнические параметры, использованные для всех моделей

Слой	Модуль Юнга E , МПа	Коэффициент Пуассона ν , безразм.	Удельный вес γ , кН/м ³	Угол внутр. трения ϕ , град.	Удельное сцепление c , кПа	Угол дилатансии ψ , град.	Условия
1. Почва	0.7–1.5	0.3	17–19	17–26	20–30	7–10	Предельн.
	0.7–1.5	0.3	17–19	17–26	20–30	7–10	Остаточн.
	1.1	0.3	18	21.5	25	8.5	Использ.
2. Конгломерат	5000	0.25–0.3	20.4	30–33	2000–5000	7–10	Предельн.
	5000	0.25–0.3	20.4	30–33	2000–5000	7–10	Остаточн.
	5000	0.3	20.4	31.5	3500	8.5	Использ.
3. Песчаник	155 ^μ	0.2 ^e	16.5 ^μ	42	150	3 ^e	Предельн.
	155 ^μ	0.2 ^e	16.5 ^μ	36	13	3 ^e	Остаточн.
	155 ^μ	0.2 ^e	16.5 ^μ	42	150	3 ^e	Использ.
4. Алевролит	285 ^μ	0.2 ^e	15.8 ^μ	42	150	3 ^e	Предельн.
	285 ^μ	0.2 ^e	15.8 ^μ	36	13	3 ^e	Остаточн.
	285 ^μ	0.2 ^e	15.8 ^μ	42	150	3 ^e	Использ.
5. Глина	50–200	0.3	19.2	19–22	20	6–11	Предельн.
	50–200	0.3	19.2	7	0	6–11	Остаточн.
	125	0.3	19.2	20.5	20	8.5	Использ.

Примечания. Свойства песчаника и алевролита определены по результатам лабораторных испытаний. Свойства почвы, конгломерата и глины оценены по литературным данным (Gasbarrone, 2005; Margottini, Spizzichino, 2020; Shafiei, Dusseault, 2008). Верхние индексы «μ» и «e» обозначают среднее значение и оценку соответственно; значения взяты из работы Бергамини (Bergamini, 2020). Для упругопластических материалов учитываются все шесть параметров, тогда как для чисто упругих материалов учитываются только модуль Юнга, коэффициент Пуассона и удельный вес.

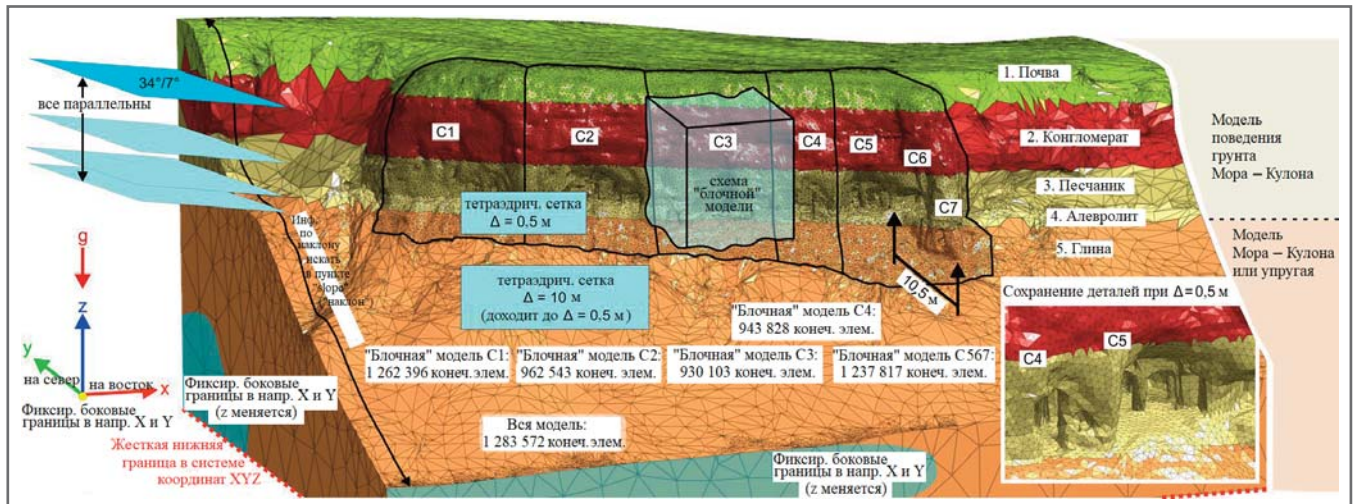


Рис. 13. Модели всего слагающего обрыв грунтового массива и «блочные» модели для каждой пещеры (изображение экспортировано из программы midas GTS NX). Литологические свойства применяются к разным сечениям сетки (то есть не к разным геометриям), поэтому литологические единицы разделяются параллельными плоскостями напластования, чему соответствует расположение элементов тетраэдрической сетки. Все «блочные» модели имеют тетраэдрическую сетку с размером ячеек 0,5 м; в остальном к ним применены те же условия моделирования, что и для моделей всего грунтового массива, слагающего обрыв

Таблица 4. Серия созданных конечноэлементных моделей

Серия моделей	Аббревиатура	Объекты	Геомеханический сценарий
Мора – Кулона	МК (MC)	Весь обрыв, "блочные" модели	Статическая устойчивость (за счет эквивалентной пластической деформации и полного переноса) с допущением развития классического оползня
Мора – Кулона и упругих для слоя 5	МК-У5 (MC-EL5)	Весь обрыв, "блочные" модели	Статическая устойчивость (за счет растягивающего напряжения, сжимающего напряжения и эквивалентной пластической деформации) с исключением развития классического оползня
Мора – Кулона и упругих для склона	МК-Ус (MC-ELs)	Весь обрыв	
Мора – Кулона и упругих для слоя 5, а также с ручным использованием метода снижения прочности	МК-У5-рМСП (MC-EL5-mSRM)	Весь обрыв, "блочные" модели	Статическая устойчивость (за счет растягивающего напряжения, сжимающего напряжения и эквивалентной пластической деформации) с фокусированием на воздействии выветривания
Упругих	У	Весь обрыв, "блочные" модели	Стабильность крутого обрывистого склона (за счет распределения напряжений и коэффициента запаса устойчивости) с фокусированием на опорных колоннах

Примечания. Модели Мора – Кулона относятся к упругопластическому поведению материала; MC – Mohr–Coulomb; EL – Elastic; m – manual; SRM – Strength Reduction Method (Dawson et al., 1999; Griffiths, Lane, 1999).

Общими для всех моделей всего крутого склона (обрыва) являлись тетраэдрические сетки с размером ячеек 0,5 м в пределах зон пещер (обведенных на рисунке 13 черными линиями) и тетраэдрическая сетка склона с размером ячеек 10 м в остальных зонах (более крупная сетка была «приспособлена» к встроенным в нее более мелким сеткам зон пещер). Сетки отдельных «блочных» моделей были исключительно тетраэдрическими с размером ячеек 0,5 м.

Свойства, приведенные в таблице 3, относились к элементам сетки, а не к геометрическим слоям, поэтому плоскости напластования в моделях не выглядели четко очерченными. Расчеты основывались на неявном методе Ньютона – Рафсона (Ben-Israel, 1966) с критериями сходимости, представленными в таблице 5. **и**

Таблица 5. Критерии сходимости, использованные в конечноэлементных моделях в программе midas GTS NX

Нелинейные расчеты		Метод снижения прочности	
Перемещение	нет	Перемещение	10 ⁻²
Усилие	10 ⁻³	Усилие	10 ⁻²
Энергия	10 ⁻⁶	Энергия	10 ⁻⁴

Во второй части перевода, которая будет вскоре опубликована в «Геоинфо», будут рассмотрены четыре серии статических упругопластических конечноэлементных моделей устойчивости рассматриваемых объектов с различными уровнями детализации, каждая из которых фокуси-

руется на определенных геомеханических сценариях, таких как классический оползень перекрывающего слоя, деформация архитектурных элементов из-за концентрации напряжений, реакция материала на выветривание и разрушение опор из-за вертикальной нагрузки.

Список литературы, использованной авторами переведенной статьи, можно посмотреть по адресу ►

link.springer.com/article/10.1007/s00603-022-02858-z.

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

Domej G., Previtali M., Castellanza R., Spizzichino D., Crosta G.B., Villa A., Fusi N., Elashvili M., Margottini C. High-resolution 3D FEM stability analysis of the Sabareebi Cave Monastery, Georgia // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Springer, 2022. Vol. 55. P. 5139–5162. DOI: doi.org/10.1007/s00603-022-02858-z. URL: link.springer.com/article/10.1007/s00603-022-02858-z.



Авторам электронного журнала «ГеоИнфо»

Журнал «ГеоИнфо» – это независимое электронное издание. Мы готовы предоставлять площадку для выступления любому автору, если материал кажется нам интересным и важным для профессионального сообщества.

Мы не рецензируем каждую статью, что позволяет нам размещать самые разные точки зрения, даже если они не вполне соответствуют общепринятым концепциям и теориям. Вместе с тем, мы оставляем за собой правой привлечь при подготовке статей к публикации независимых экспертов. Их мнение может быть опубликовано вместе со статьей по усмотрению главного редактора.

Каждый желающий в комментариях к статье может поддержать автора или высказать аргументы в пользу противоположной точки зрения. Для этого необходимо зарегистрироваться.

Требования к оформлению:

Каждая статья, присланная для публикации в журнале «ГеоИнфо», должна сопровождаться аннотацией, главной горизонтальной картинкой высокого качества (не менее 300 dpi), портретной фотографией и краткой биографией автора с контактными данными.

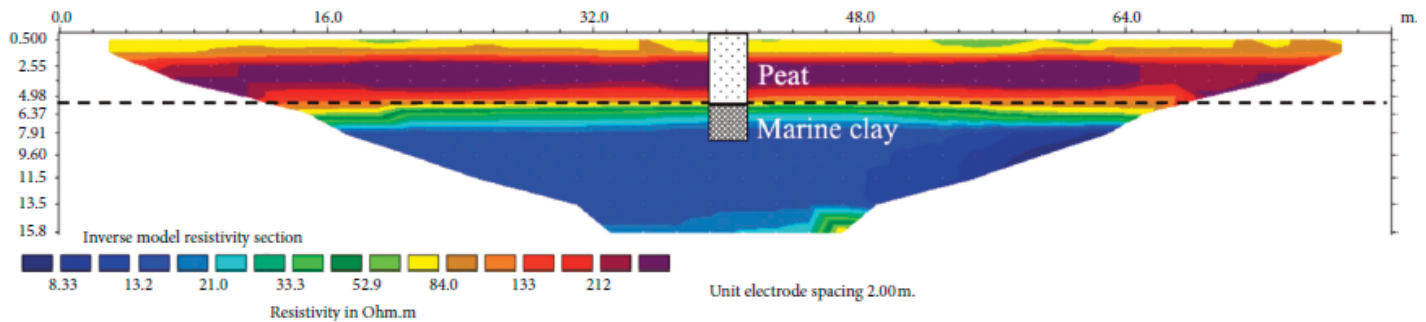
Стиль изложения – литературный.

Автор по своему желанию может дополнить статью ее английской версией или переводом ревью для англоязычной версии сайта.

Темы для статей – широкий круг проблем, актуальных в повседневной жизни руководителей изыскательских компаний и инженеров. Наша основная специализация – опыт практиков для практиков.

Высылайте Ваши статьи на электронную почту info@geoinfo.ru.

Мы будем рады сотрудничеству!



ИССЛЕДОВАНИЕ СТРАТИГРАФИИ ФОРМАЦИИ, СЛОЖЕННОЙ ТОРФОМ И ГЛИНОЙ, ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ (МАЛАЙЗИЯ)

МОХАМАД ХАБИБ-МУСА (BIN MONAMAD HABIB MUSA)

Инженерный факультет
Малайзийского университета в Сабахе,
г. Кота-Кинабалу, шт. Сабах, Малайзия
habibmusa@ums.edu.my

КАСБИ БАСРИ (KASBI BASRI)

Факультет инфраструктурной и
геоматической инженерии
Малайзийского университета имени
Туна Хусейна Онна, г. Парит-Раджа,
р-н Бату-Пахат, шт. Джохор, Малайзия
kasbibinbasri@gmail.com

БАБА МУСТА (BABA MUSTA)

Факультет естественных наук и
природных ресурсов Малайзийского
университета в Сабахе, г. Кота-
Кинабалу, шт. Сабах, Малайзия

АДНАН ЗАИНОРАБИДИН (ADNAN ZAINORABIDIN)

Центр исследований слабых грунтов
Малайзийского университета имени
Туна Хусейна Онна, г. Парит-Раджа,
р-н Бату Пахат, шт. Джохор, Малайзия

ХАРДИАНШАХ САЛЕХ (HARDIANSHAN SALEH)

Факультет естественных наук и
природных ресурсов Малайзийского
университета в Сабахе, г. Кота-
Кинабалу, шт. Сабах, Малайзия

ИСМАИЛ СААД (ISMAIL SAAD)

Факультет электротехники и
электроники Малайзийского
университета в Сабахе,
г. Кота-Кинабалу, шт. Сабах, Малайзия

Предлагаем вниманию читателей адаптированный перевод статьи «Исследование стратиграфии формации в долине Падас на Северном Борнео, сложенной торфяными грунтами и морской глиной, геофизическими методами». Эта работа была опубликована в рецензируемом журнале Applied and Environmental Soil Science («Прикладное и экологическое грунтоведение») издательством Hindawi в 2021 году по лицензии CC BY 4.0. Данная лицензия позволяет копировать и распространять статью на любом носителе и в любом формате, адаптировать, видоизменять и создавать новое, опираясь на нее, в любых целях, включая коммерческие, при указании ссылки на первоисточник. В данном случае ссылка приведена в конце перевода. Авторами переведенной статьи являются ученые из Малайзийского университета в Сабахе и Малайзийского университета имени Туна Хусейна Онна – Хабиб-Муса Бин Мохамад, Басри Касби, Муста Баба, Заинорабидин Аднан, Салех Хардианшах и Саад Исмаил.

Для оценки мощности торфяных грунтов в округе Бофорт в Восточной Малайзии указанными авторами были выполнены геофизические исследования методами электротомографии (ЭТ, ERT), вызванной поляризации (ВП, IP) и преломленных волн (МПВ, SR).

Торфяники являются важным природным хранилищем углерода и играют ключевую роль в глобальном цикле этого элемента. Исследования с помощью ЭТ и ВП были выполнены по трем профилям с различной мощностью торфа с использованием установки (конфигурации электродов) Шлюмберже. Съемка МПВ проводилась по тем же профилям с использованием вертикальных сейсмоприемников. Торфяной грунт характеризовался низкой сейсмической скоростью и высоким удельным сопротивлением. Методы ЭТ и ВП позволили четко определить границу раздела между торфяным грунтом и подстилающей его морской глиной, поскольку эти слои значительно различались по своим геоэлектрическим характеристикам. Но изображение, полученное с помощью МПВ, не дало возможности проследить подошву торфа, поскольку разница в жесткости зон грунтов выше и ниже этой границы была очень мала.

В целом был сделан вывод, что методы ЭТ и ВП являются полезной альтернативой для определения стратиграфии торфяного грунта. Комбинированное применение ЭТ, ВП и традиционного метода бурения удовлетворяет потребность в картировании стратиграфии при больших объемах торфа с волнообразным залеганием его слоя и в разных экологических условиях. Таким образом, статья демонстрирует ценность комплексного геофизического подхода к изучению стратиграфии торфяников.

ВВЕДЕНИЕ ►

Торфяники играют важную роль в глобальном цикле углерода и влияют на концентрацию парниковых газов в атмосфере. В своем естественном состоянии они накапливают большое количество углерода [1–3]. Из-за больших количеств органического углерода такие грунты работают как источники или поглотители углекислого газа в зависимости от их нынешнего состояния. Содержание углерода в торфяниках зависит от их объемов и специфической стратиграфии, а также таких их свойств, как объемная плотность и содержание органического вещества [4]. Для правильной оценки объема торфа важной информацией является определение мощности его слоя, в то время как исследование содержания органических веществ имеет решающее значение для оценки происходящей деградации этого грунта и количества хранящегося в нем углерода. Содержание органики уменьшается с увеличением объемной плотности и степени разложения торфа [5].

В Малайзии насчитывается 2,4 млн га торфяников, что составляет около 7,45% от общей площади суши этой страны. В целом подошвы этих грунтов в Малайзии являются волнистыми и располагаются на глубине от 1 до 20 м [6], что затрудняет точные оценки их объемов. Соответствующие районы являются частью большого глобального запаса углерода в торфяниках. Поэтому точное определение объемов торфяных залежей важно для точной оценки количества хранящегося в них углерода. Обычно их мощность для оценки объемов определяется обычным методом бурения. Этот метод до сих пор широко используется, поскольку прямое измерение обеспечивает определенность результатов. Однако он является интрузивным, дает локализованные данные и для приблизительного картирования стратиграфии торфяных залежей на больших площадях требует большого количества точек исследований, значительных затрат времени и средств. В тропических условиях ограниченная доступность территорий еще больше усложняет его использование.

Некоторые исследователи уже довольно давно предлагали применять на торфяниках геофизические методы. И с 1980-х годов для оценки мощности торфа успешно применяют неинтрузивные геофизические исследования, в частности георадиолокационные (ГРЛ, GPR), то есть с помощью георадаров [4, 7–9]. Однако глубина исследова-

ния методом ГРЛ зависит от электропроводности торфяного грунта и широко признано, что в торфяниках георадары с центральной частотой антенн от 50 до 200 МГц могут дать хорошие данные только для глубин до 10 м [10, 11]. Диэлектрическая проницаемость торфа варьирует от 5 до 70 в зависимости от объемного содержания воды [11, 12]. Это делает данный метод менее популярным для исследований торфяных грунтов мощностью более 10 м.

В последнее время для поддержки результатов использования традиционного метода бурения набирают популярность геофизические исследования стратиграфии торфяников с помощью методов электротомографии (ЭТ, ERT) и вызванной поляризации (ВП, IP). Потенциально также может использоваться сейсмический метод преломленных волн (МПВ, SR).

Применение этих методов ранее ограничивалось поиском археологических сооружений [13], изучением проникновения в грунты морской воды и потенциала их разжижения [14, 15], прослеживанием аллювиальных водоносных горизонтов [16] и исследованиями оползней [17]. Однако они также дали возможность картирования стратиграфии торфяных залежей. Их преимущества включают большие объемы съемки на большую глубину, а также экономию средств и времени. Поэтому комплексные геофизические исследования, которые предоставляют информацию о физических свойствах органического грунта, подстилаемого минеральным, могут улучшить и понимание стратиграфии торфяных залежей.

Методы ЭТ, ВП и МПВ могут помочь в обследовании торфяников, особенно для изучения взаимосвязи между стратиграфией минеральных грунтов и свойствами торфа. По сравнению с ГРЛ эти методы не ограничены изучением зон выше минерального грунта поскольку возможная глубина исследований разрезов у них значительно больше.

Электропроводность (объемная удельная проводимость), обратная удельному электрическому сопротивлению и измеряемая методами сопротивлений на постоянном токе (в данном случае ЭТ), зависит от удельной проводимости жидкости, содержания влаги в грунте и поверхностной проводимости [8]. Электропроводность поровой воды в торфяном грунте обычно увеличивается с глубиной, поскольку минеральный грунт, обычно подстилаю-

щий торфяной, является источником неорганических растворенных веществ [8]. Сильно разложившийся торфяной грунт также имеет более высокий поверхностный заряд. Это говорит о том, что поверхностная проводимость, вероятно, значительно влияет на объемную проводимость [8], в то время как методом ВП измеряется способность материала временно накапливать заряд (его заряжаемость) или, в более сложном случае, величина поляризации материала. Эффект вызванной поляризации проявляется в виде частотно-зависимого удельного сопротивления или в виде остаточного напряжения после прекращения подачи тока. Наиболее распространенным показателем ВП является заряжаемость грунта во временной области.

Результаты измерений ВП зависят главным образом от химии поверхности, которая включает плотность электрического заряда, площадь поверхности и химический состав жидкости [8]. Заряжаемость в значительной степени зависит также от емкости катионного обмена (ЕКО – cation exchange capacity, СЕС), связанной с глинистыми минералами [18]. Органический материал с низкой степенью разложения обычно связан с высокой поверхностной плотностью электрического заряда, что приводит к большой величине ЕКО [19]. Поскольку плотность заряда считается одним из основных факторов, влияющих на эффект ВП, авторы ожидали, что она будет значительно различаться для торфяного и подстилающего его минерального грунта, обеспечивая большой контраст на изображении для определения границы между этими слоями.

Метод преломленных волн (МПВ) отражает геологическое строение с помощью измерения скоростей объемных сейсмических волн [20]. Измеряя время прохождения этих волн, можно идентифицировать различные подповерхностные слои различного состава и разной жесткости. Поскольку торфяной грунт является очень слабым (мягким) материалом, ожидается, что контраст между торфяным и подстилающим его грунтом в отношении жесткости будет сильным и обеспечит четкое определение подошвы торфа.

В этой статье авторы представляют результаты полевых исследований с целью изучения полезности геофизических методов (ЭТ, ВП и МПВ) для понимания стратиграфии крупного торфяника. Геофизические данные сравниваются с

результатами обычного бурения с прямым отбором проб из торфяной толщи. Основная цель – продемонстрировать ценность комплексного геофизического подхода к изучению стратиграфии торфяников. Авторы дают важную информацию по результатам двух геоэлектрических методов, в том числе демонстрируют значения удельного сопротивления и заряжаемости грунта. Характеристика жесткости с помощью МПВ в данном исследовании не использовалась для изучения электрических свойств и жесткости торфяного грунта (для этого требуются дополнительные лабораторные испытания). Вместо этого авторы показывают, как полевые геофизические методы дают ценную информацию о стратиграфии крупного торфяника на обширной территории его залегания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ►

Описание исследуемой территории ►

Территория исследований была расположена недалеко от лесного заповедника на полуострове Клиас в округе Бофорт малайзийского штата Сабах на севере острова Борнео (рис. 1). (Борнео, или Калимантан, – третий по величине остров в мире, имеющий площадь 743 330 км² и расположенный в центре Малайского архипелага в Юго-Восточной Азии. – *Ред.*)

Площадь, на которой распространены торфяные грунты в Сабахе, составляет примерно 116 965 га из 2,4 млн га во всей Малайзии. Наибольшая часть торфяных грунтов приходится на полуостров Клиас и долины рек Кинабатанган и Сегама. Торфяники в этих местах в основном встречаются в мощных недреннированных заболоченных условиях и состоят из разлагающихся растительных остатков. Влажность этих грунтов очень высока – от 448,32 до 985,4% [21]. Содержание органических веществ и клетчатки в них составляет от 53,97 до 95,82% и от 61,61 до 79,4% соответственно [21–23]. По классификации Министерства сельского хозяйства США, данные грунты относятся к торфам от среднеразложившихся до волокнистых. По 10-балльной шкале Л. фон Поста степень их разложения находится между H6 и H7 [22], что также относится к категориям торфов от среднеразложившихся до волокнистых.

Полевые исследования ►

Определение мощности торфяного грунта *in situ* проводилось с использо-

ванием обычного бурового оборудования. В общей сложности на изучаемой территории было исследовано 3 скважины – S1, S2, и S3. Места их расположения были выбраны таким образом, чтобы можно было представить диапазон глубин залегания торфа и геоморфологических условий. Они также использовались в качестве средних точек при геофизических исследованиях для сравнения результатов. Грунтовые колонки скважин были получены с помощью пробоотборника нидерландской компании Eijkelkamp, который отбирал полунарушенные образцы торфа с шагом по высоте 0,5 м до тех пор, пока не заканчивалась торфяная толща. Во время взятия проб были получены изображения колонок, а также оценены и зарегистрированы величины объемной плотности образцов.

Съемки методами ЭТ и ВП проводились с помощью универсального электроразведочного инструмента Terrameter LS производства шведской компании АВЕМ с автоматизированным блоком сбора данных. Для получения геоэлектрических разрезов торфяных и подстилающих их минеральных грунтов использовалась установка (конфигурация электродов) Шлюмберже с расстоянием между электродами 2 м. Для более хорошего разрешения приповерхностных геоэлектрических разрезов торфяных грунтов использовалась короткая сейсмическая коса, содержащая 41 стальной электрод. Средние точки всех профилей съемки находились в местах расположения скважин, чтобы можно было сопоставлять результаты. Использовались методики полевых геофизических исследований в соответствии с практическим руководством по получению двумерных изображений среды по данным электроразведки, составленным Лоуком (Loke) [24]. Анализ данных выполнялся в соответствии с руководством [25] по использованию компьютерной программы Res2DInv, разработанной Малайзийской компанией Geotomo Software. Для анализа данных были синхронизированы настройки полевых установок, чтобы обеспечить использование правильной конфигурации. Неадекватные данные, наблюдавшиеся на псевдоразрезах, были удалены, чтобы среднеквадратическая погрешность была низкой. Затем полученные данные инвертировали методом наименьших квадратов в программе Res2DInv [26].

Затем были выполнены исследования МПВ с помощью сейсмографа Ter-

raloc Pro II производства шведской компании АВЕМ. Общая длина расстановки сейсмоприемников (геофонов) составила 23 м при шаге между ними 1 м. Источники колебаний располагались по обе стороны от приемных линий между сейсмоприемниками 1 и 2, 6 и 7, 12 и 13, 18 и 19, 23 и 24. В каждом пункте возбуждения выполнялось по 5 инициаций сейсмических колебаний. В качестве их источника применялись 7-килограммовая кувалда и стальная пластина. Большой вес кувалды обеспечивал высокоамплитудный спектр сейсмических колебаний [27, 28]. Стальная пластина использовалась в качестве амортизатора удара для увеличения накопления энергии с целью генерации более высоких частот, что позволяло лучше выполнять интерпретацию разреза небольшой глубины [28, 29]. Однако, чтобы свести к минимуму риск проникновения пластины источника в торфяной грунт во время удара, применялась изготовленная на заказ специальная стальная пластина меньшей толщины и, соответственно, небольшой массы [28, 30]. Для приема сигналов использовались 24 сейсмоприемника с собственной частотой колебаний 14 Гц. Обработка данных проводилась с помощью модулей Pickwin и Plotrefa программы SeisImager/2D™ от компании Geometrics (США). Поперечное сопротивление T для m -слоя разреза вычислялось по следующей формуле [31]:

$$T = \sum_{i=1}^m \rho_i h_i,$$

где ρ_i , h_i – удельное сопротивление и толщина i -го слоя соответственно.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ ►

Грунтовые колонки скважин ►

Грунтовые колонки скважин были получены с помощью пробоотборника нидерландской компании Eijkelkamp, который отбирал полунарушенные образцы торфяного грунта с шагом по высоте 0,5 м до тех пор, пока не заканчивался слой торфа. Во время взятия проб были получены изображения колонок, а также оценены и зарегистрированы величины объемной плотности образцов.

Эти исследования выявили, что мощность торфа для скважин S1, S2 и S3 составила 3,5; 5,4 и 6,8 м соответственно. На рисунках 2–4 представлены изображения участков полученных колонок. На них невооруженным гла-

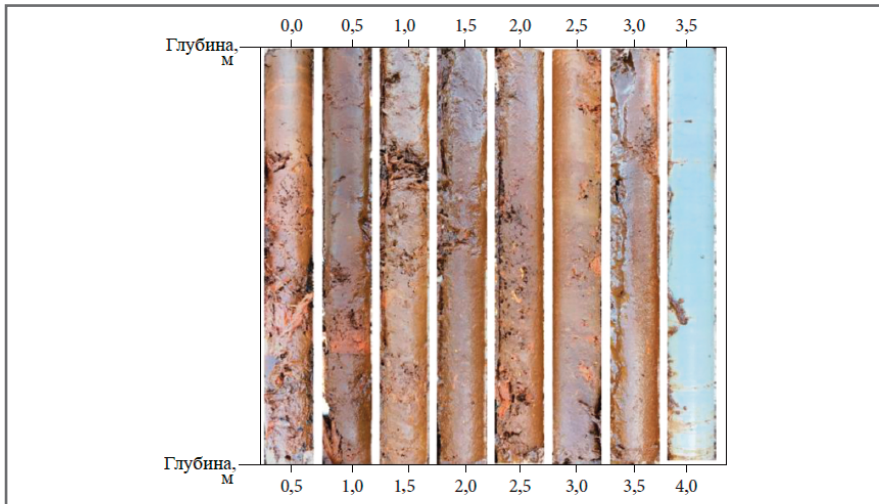


Рис. 2. Участки грунтовой колонки скважины S1

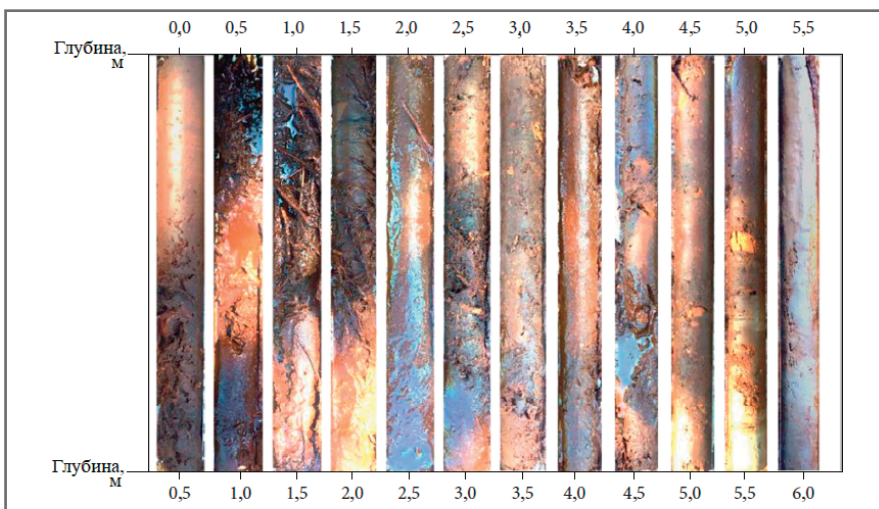


Рис. 3. Участки грунтовой колонки скважины S2

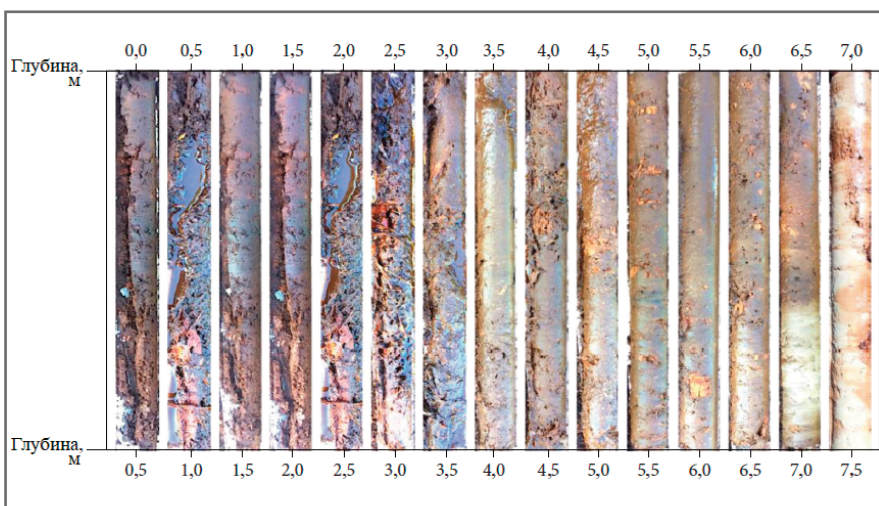


Рис. 4. Участки грунтовой колонки скважины S3

торфа [34], поэтому наблюдение за ней в массиве торфяных грунтов представляет большой интерес.

По результатам бурения был аппроксимирован приблизительный стратиграфический разрез изучаемой

территории, показанный на рисунке 5. Видно, что мощность слоя торфа в данной области варьирует. Это позволяет предположить, что массив этого грунта представляет собой торфяной бассейн.

Двумерные ЭТ и ВП ▶

Результаты инверсии данных ЭТ и ВП при использовании шага между электродами 2 м показаны на рисунках 6 и 7, где для сравнения также наложены грунтовые колонки по данным бурения и отбора проб для трех вышеуказанных скважин.

Итоги инверсии электротомографических данных, представленные на рисунке 6, показывают однородный верхний высокоомный слой. Его подстилает электропроводящая толща различной толщины, идентифицированная как морская глина, которая, по-видимому, обеспечивает большой контраст значений удельного сопротивления по сравнению со слоем торфяного грунта. Изображения ЭТ после инверсии указывают на постепенное уменьшение удельного сопротивления торфа с глубиной, исключая верхние 2 м. (Аналогичный вывод был получен и при других исследованиях [8, 35], когда проводимость торфяного грунта постепенно увеличивалась с глубиной.) В верхних 2 м наблюдались несколько более низкие величины удельного сопротивления торфа. Этому в основном способствовали большие расстояния между электродами, поскольку были получены нулевые показания, что привело к экстраполяции доступных значений для самых неглубоких зон. (Как упоминалось ранее [36], из-за большого расстояния между электродами неглубокие разрезы бывают частично негодными.) В слое торфяного грунта были определены более высокие значения удельного сопротивления по сравнению со слоем морской глины. Низкие сопротивления в морской глине наблюдались из-за глинистых частиц, которые облегчают поверхностную проводимость [37].

Сравнение между значениями глубины залегания подошвы торфяного грунта, определенными с помощью ЭТ и бурения, показывает минимальное расхождение. Но необходимо соблюдать особую осторожность при анализе результатов ЭТ в случае большого расстояния между электродами, которое оказывает фундаментальное влияние на разрешение. Уменьшение этого расстояния улучшает разрешение в неглубоких зонах разреза, однако риск ограничения объема может повлиять на генерируемое изображение. Согласно работе Слейтера и Рива [8] размер элемента изображения логарифмически растет с глубиной с увеличением расстояния от источника тока, но при этом значительно уменьшается разрешение.

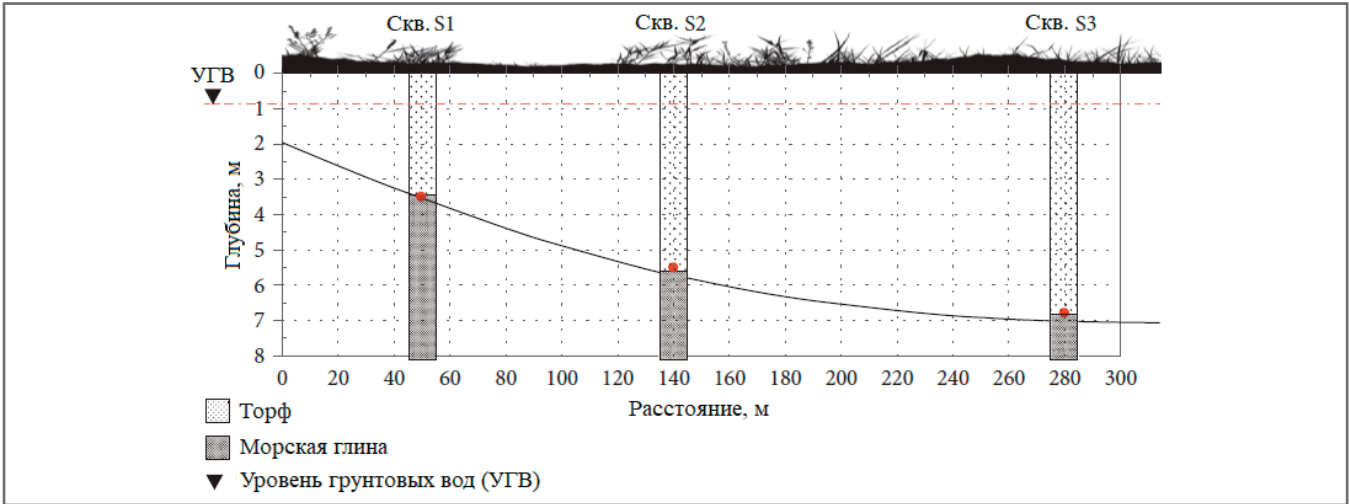


Рис. 5. Приблизительный стратиграфический разрез исследуемой территории по данным для трех скважин (S1, S2 и S3)

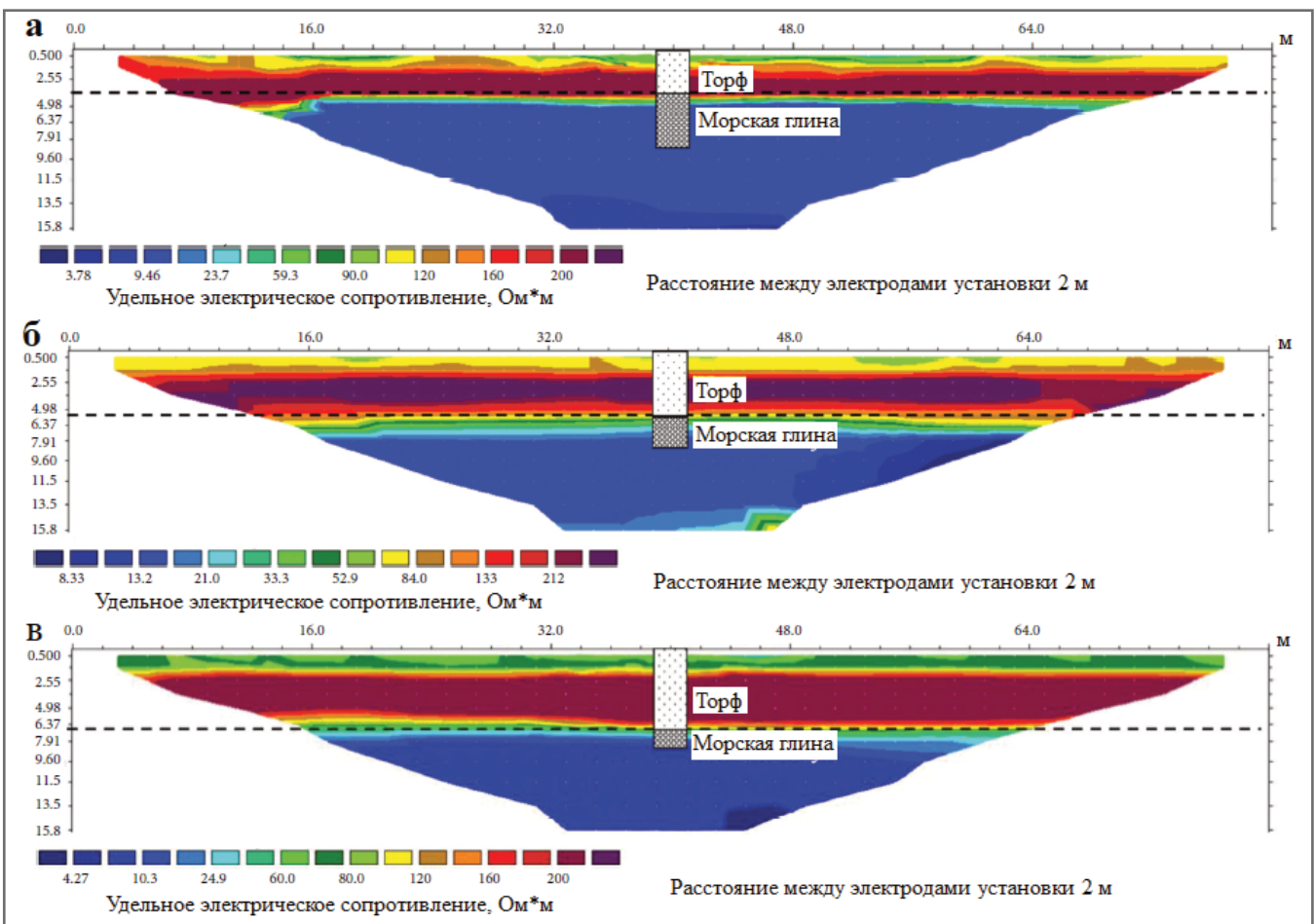


Рис. 6. Модели геоэлектрических разрезов после инверсии для скважин S1 (а), S2 (б) и S3 (в)

Поэтому расстояние между электродами должно быть подобрано в соответствии с целью или требуемой глубиной исследования для обеспечения более хорошей интерпретации данных.

Результаты инверсии данных ВП, показанные на рисунке 7, определяют торф как менее заряжаемый (менее поляризуемый) по сравнению с залегающей ниже морской глиной. Этому может способствовать менее заряжаемый

органический материал в торфяном грунте. (Как обсуждалось в предыдущем исследовании [8], реакция ВП в торфе обусловлена увеличением поляризации, а не результатом изменения объемной проводимости; и поляризация предположительно происходит вследствие поверхностной плотности электрического заряда органического материала. Однако величина заряжаемости (или поляризации), по-видимо-

му, является хорошим показателем толщины торфяного грунта.) Высокие значения заряжаемости слоя морской глины по сравнению с торфяным обеспечивают четкое разделение между этими двумя слоями, что позволяет с большой точностью определять стратиграфию торфяного грунта.

Для дальнейшего исследования точности значений удельного сопротивления и заряжаемости при определении

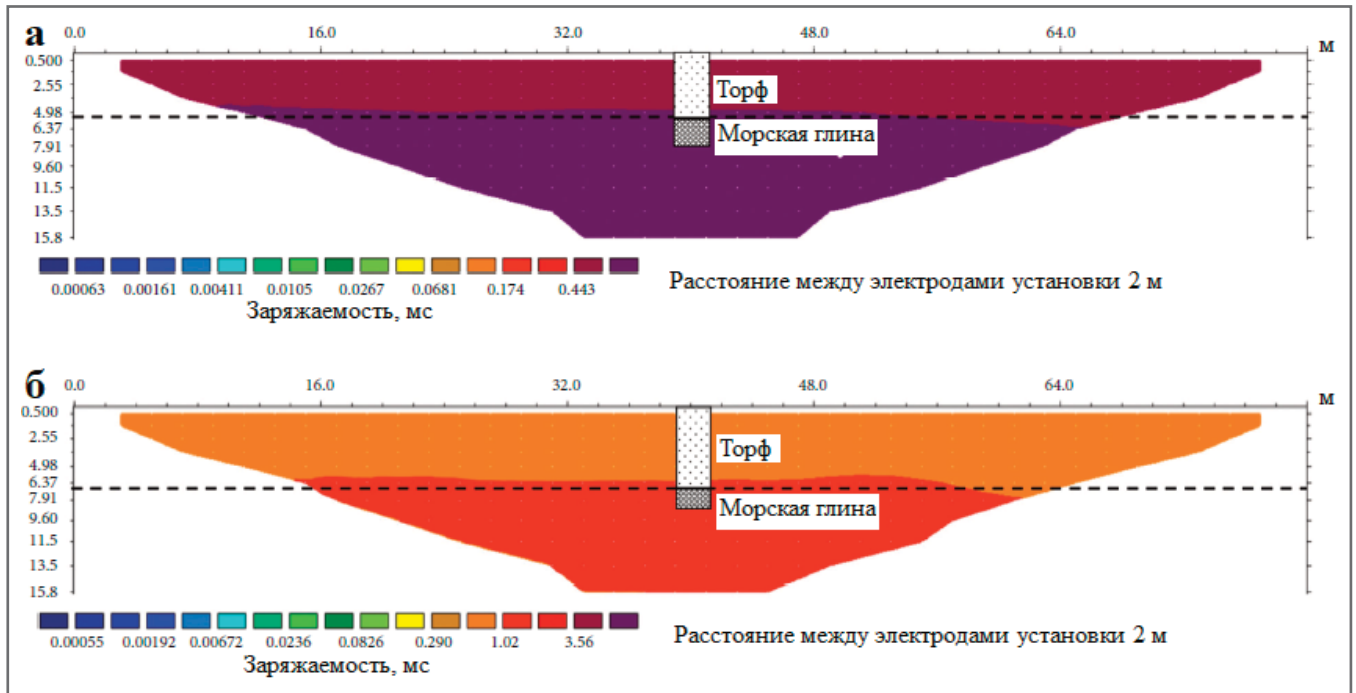


Рис. 7. Модели разрезов временного параметра вызванной поляризации, характеризующего заряжаемость (поляризуемость) среды, после инверсии для скважин S2 (а) и S3 (б)

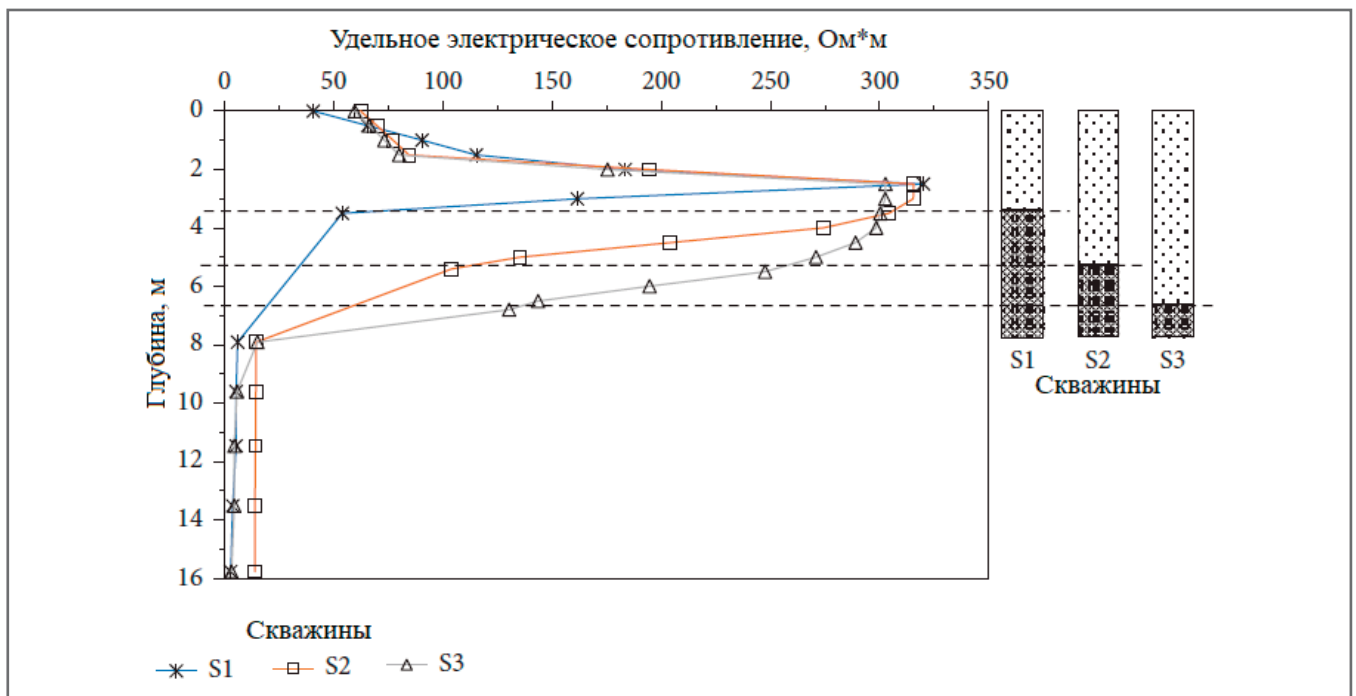


Рис. 8. Изменения удельного сопротивления грунта с глубиной на полуострове Клиас

мощности торфяного грунта из средних точек были извлечены одномерные профили (колонки) для сравнения с данными бурения скважин. На рисунке 8 представлены значения удельного сопротивления торфяного грунта для средних точек кос электродов (takeout lines). На графике видны низкие величины сопротивления в верхних двух метрах из-за больших расстояний между электродами, что делает показания менее надежными, поскольку осталь-

ные значения могут быть получены только путем экстраполяции данных. На глубине более 2 м значения удельного сопротивления торфа немного уменьшаются с глубиной. Как упоминалось ранее, был выявлен рост степени разложения торфа с глубиной, о чем свидетельствует уменьшение торфяных волокон при увеличении глубины. При низкой степени разложения в торфе имеются «свежие» волокна, но они являются полностью распавшимися

при более высокой степени разложения [38]. Сопротивление торфяного грунта уменьшалось с увеличением степени разложения [39], в то время как на глубине вблизи перехода к слою слабых (пластичных) глин оно снижалось значительно. Такое существенное увеличение электропроводности грунта скорее всего было обусловлено наличием глинистой фракции, которая обеспечивает высокую катионообменную емкость грунта, способствующую

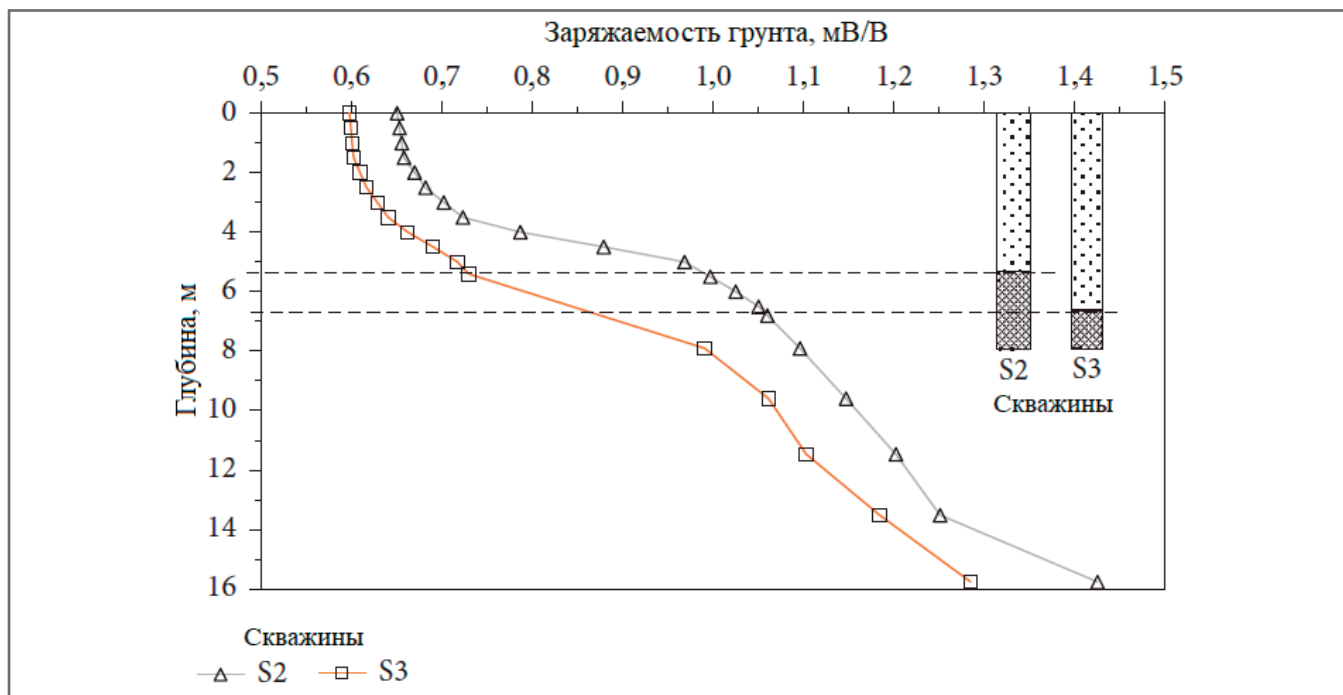


Рис. 9. Изменения заряжаемости грунта с глубиной на полуострове Клиас

его высокой проводимости [6, 40]. В целом значения удельного сопротивления торфа колебались от 40,8 до 258,5, от 62,5 до 315,7 и от 59,8 до 302,8 Ом*м для скважин S1, S2 и S3 соответственно.

Значения заряжаемости, извлеченные из изображений, полученных методом ВП, показаны на рисунке 9. Они немного увеличиваются с глубиной в слое торфяного грунта, в то время как вблизи переходной зоны и в слое морской глины они растут с глубиной значительно. Полученные результаты показывают, что торфяной грунт был менее заряжаемым (менее поляризуемым) по сравнению с морской глиной. Значения заряжаемости торфа варьировали от 0,598 до 0,729 и от 0,651 до 1,060 мВ/В для скважин S2 и S3 соответственно.

Двумерные результаты применения МПВ

На трех участках были пройдены три профиля методом МПВ. Средние точки были зафиксированы в местах расположения скважин, как и для методов ЭТ и ВП, чтобы можно было выполнить сравнения. Наиболее важным шагом в анализе данных МПВ является определение времени пробега волн по сейсмограммам. На рисунке 10 показан пример расчетных и наблюдаемых времен пробега сейсмических волн. Видно незначительное расхождение между рассчитанными и наблюдаемыми временами пробега со среднеквадратическими ошибками от 3,8 до 4,5%.

Полученные разрезы скоростей Р-волн (V_p) показаны на рисунке 11. В целом наблюдалось нечеткое разделение между слоями торфа и подстилающей его морской глины. Контраст между наблюдаемыми значениями V_p для них был небольшим, что затрудняло определение подошвы торфяного грунта и, таким образом, не позволяло определить его мощность. Небольшое увеличение жесткости торфа с глубиной было обусловлено низкой объемной плотностью и высоким уровнем грунтовых вод [41].

Изображения, полученные методом МПВ, также показывают, что величины V_p для торфяного грунта варьируют в горизонтальном направлении. Такое поведение скорее всего определяется неоднородностью этого грунта. Его свойства изменяются по горизонтали и по вертикали в зависимости от содержания органических веществ [42]. Неоднородность торфа обусловила изменчивость его жесткости в горизонтальном направлении [43]. Обнаружение данной особенности свидетельствует о важности геофизических методов при исследовании характеристик торфяных грунтов, поскольку метод преломленных волн позволил выявить изменчивость по горизонтали, чего не позволил традиционный метод бурения. Однако был сделан вывод, что для определения стратиграфии торфяных грунтов, подстилаемых слабыми грунтами типа пластичной морской глины, МПВ менее надежен по сравнению с методами ЭТ и ВП. Если же под торфом залегает более жесткий

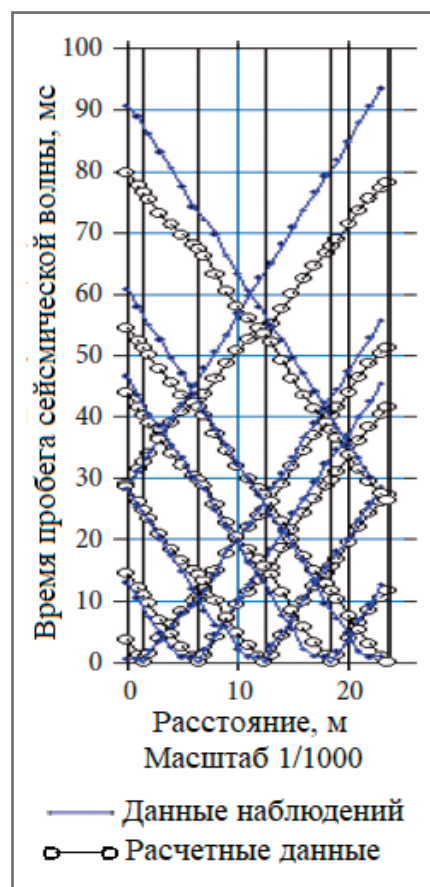


Рис. 10. Пример расчетных и наблюдаемых времен пробега сейсмических волн

грунт, то метод преломленных волн может обеспечить более хороший контраст между этими двумя слоями по жесткости, что позволяет точно определить мощность торфяного грунта.

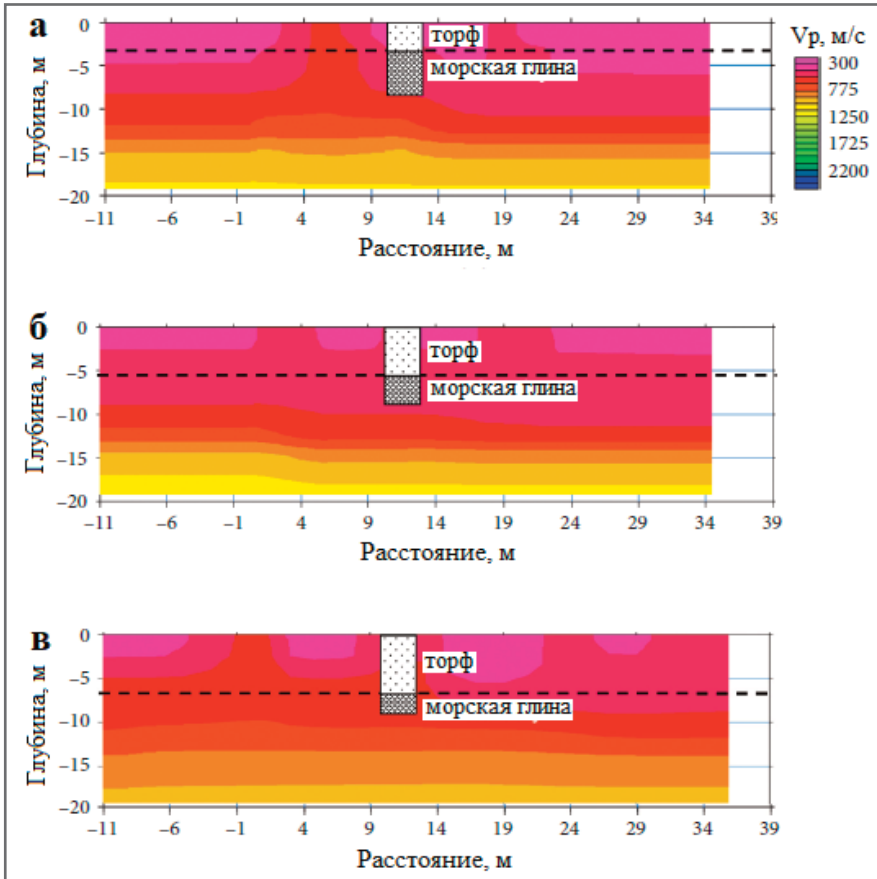


Рис. 11. Разрезы скоростей Р-волн (V_p) для скважин S1 (а), S2 (б) и S3 (в)

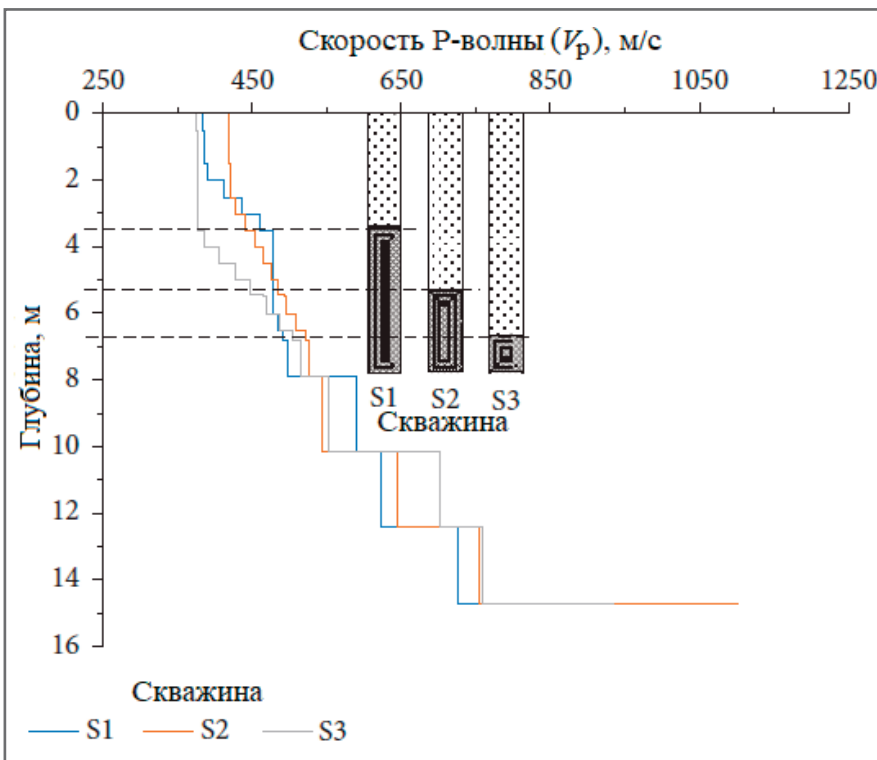


Рис. 12. Значения скорости Р-волн (V_p) по сравнению с данными бурения в 1D-варианте

Из 2D-изображений, полученных с помощью МПВ, были извлечены значения V_p для средних точек линий съемки в целях сравнения с данными бурения. Из рисунка 12 видно, что величины V_p

для торфяного грунта у поверхности немого увеличиваются с глубиной и становятся значительными на глубине более 3 м. Наклон приращений V_p на глубине более 3 м постоянно вызывал


трудности при определении перехода между торфом и морской глиной, особенно для торфяного грунта мощностью более 3 м. Полученные данные подтвердили сделанный ранее вывод о невозможности точного определения толщины слоя торфа методом преломленных волн из-за постепенного увеличения значений V_p с глубиной. (Торф в исследуемом районе классифицируется как среднеразложившийся, а торф на полуострове Клиас – как среднеразложившийся с высоким содержанием органических веществ [44].)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное исследование электрических свойств и жесткости крупных торфяников в на полуострове Клиас в штате Сабах (Малайзия) продемонстрировало ценность результатов использования методов электротомографии (ЭТ), вызванной поляризации (ВП) и метода преломленных волн (МПВ) для изучения торфяных залежей. Геофизические данные были сопоставлены с результатами изучения образцов торфа, отобранных при бурении трех скважин.

ЭТ и ВП являются отличными методами исследований электрических свойств и стратиграфии торфяных грунтов. Модели геоэлектрических разрезов и заряжаемости среды после инверсии выявили изменчивость толщины слоя торфяного грунта, что позволило лучше оценить объем торфяников. Значения удельного электрического сопротивления торфа немного уменьшаются с глубиной, что обусловлено возрастающей степенью его разложения, в то время как вблизи перехода к слою морской глины они значительно падают из-за увеличения катионообменной емкости грунта.

Однако изображения, полученные с помощью МПВ, определили подошву торфяного слоя неточно из-за наблюдавшегося постепенного увеличения жесткости в слое торфа и в слое морской глины. Низкая объемная плотность и высокий уровень грунтовых вод в торфяном грунте вызывают лишь заметное увеличение прочности с глубиной. Небольшая разница в значениях жесткости между обоими слоями затрудняет определение подошвы слоя торфа, что делает невозможным точное определение его стратиграфии. Несмотря на высокое качество 2D-изображений МПВ, требуются авторитетные суждения специалистов и дополнительные данные бурения, если недоступны предварительные данные.

В целом, изображения ЭТ и ВП дают ценную информацию об электрических свойствах торфяных грунтов и определяют их стратиграфию с высокой точностью, что позволяет более точно оценивать объемы торфяников. 

Эта работа была поддержана центром управления исследованиями и инновациями Малайзийского университета в Сабахе (UMS) в рамках грантовой программы по повышению культурного уровня SGA0090-2019. Авторы благодарят своих коллег с факультета естественных наук и природных ресурсов Малайзийского университета в Сабахе, предоставивших информацию, оборудование и экспертные знания, которые значительно помогли выполнению исследований, а также Малайзийский университет имени Туна Хусейна Онна за ценную техническую поддержку этого проекта.

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

Mohamad H.M., Kasbi B., Baba M., Adnan Z., Hardianshah S., Ismail S. Investigating peat soil stratigraphy and marine clay formation using the geophysical method in Padas Valley, Northern Borneo // Applied and Environmental Soil Science. Hindawi, May 2021. Article ID 6681704. 12 p. DOI:10.1155/2021/6681704. URL: doi.org/10.1155/2021/6681704.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►

- Limpens J., Berendse F., Blodau C. et al. Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications – a synthesis // Biogeosciences. 2008. Vol. 5. № 5. P. 1475–1491.
- Altdorff D., Bechtold M., van der Kruk J., Vereecken H., Huisman J.A. Mapping peat layer properties with multi-coil offset electromagnetic induction and laser scanning elevation data // Geoderma. 2016. Vol. 261. P. 178–189.
- Silvestri S., Knight R., Viezzoli A. et al. Quantification of peat thickness and stored carbon at the landscape scale in tropical peatlands: a comparison of airborne geophysics and an empirical topographic method // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2019. Vol. 124. № 12. P. 3107–3123.
- Walter J., Hamann G., Luck E., Klingenfuss C., Zeitz J. Stratigraphy and soil properties of fens: geophysical case studies from northeastern Germany // Catena. 2016. Vol. 142. P. 112–125.
- Heller C., Zeitz J. Stability of soil organic matter in two northeastern German fen soils: the influence of site and soil development // Journal of Soils and Sediments. 2012. Vol. 12. № 8. P. 1231–1240.
- Bujang B.K.H., Prasad A., Asadi A. et al. Geotechnics of organic soils and peat // Earth Sciences, Engineering and Technology. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.
- Bjelm L. Geological interpretation of subsurface interface radar in Peatlands // Proceedings of the 6th International Peat Congress of the International Peat Society. Duluth, Minnesota., 1980.
- Slater L.D., Reeve A. Investigating peatland stratigraphy and hydrogeology using integrated electrical geophysics // Geophysics. 2012. Vol. 67. № 2. P. 365–378.
- Plado J., Mustasaar I., Jxeleht A. Ground-penetrating radar study of the Rahivere peat bog, eastern Estonia // Estonian Journal of Earth Sciences. 2011. Vol. 60. № 1. P. 31.
- Lowe D.J. Application of impulse radar to continuous profiling of tephra-bearing lake sediments and peats: an initial evaluation // New Zealand Journal of Geology and Geophysics. 1985. Vol. 28. № 4. P. 667–674.
- Theimer B.D., Nobes D.C., Warner B.G. A study of the geoelectrical properties of peatlands and their influence on ground-penetrating radar surveying // Geophysical Prospecting. 1985. Vol. 42. № 3. P. 179–209.
- Kujala K., Seppala M., Holappa T. Physical properties of peat and palsa formation // Cold Regions Science and Technology. 2008. Vol. 52. № 3. P. 408–414.
- Balkaya C., Kalyoncuoglu U.Y., Ozhanlı M., Merter G., Cakmak O., Talih-Guven I., Ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography studies in the biblical Pisidian Antioch city, southwest Anatolia // Archaeological Prospection. 2018. Vol. 25. № 4. P. 285–300.
- Ali K.M., Ozurlan G., Balkaya C. Geoelectrical investigation of seawater intrusion in the coastal urban area of Canakkale, NW Turkey // Environmental Earth Sciences. 2015. Vol. 73. № 3. P. 1151–1160.
- Caglayan B., Kaya M.A., Gokturkler G. Delineation of shallow resistivity structure in the city of Burdur, SW Turkey, by vertical electrical sounding measurements // Environmental Geology. 2009. Vol. 57. № 3. P. 571–581.
- Gokhan G., Balkaya C., Erhan Z. et al. Investigation of a shallow alluvial aquifer using geoelectrical methods: a case from Turkey // Environmental Geology. 2008. Vol. 54. № 6. P. 1283–1290.
- Gokhan G., Balkaya C., Erhan Z. Geophysical investigation of a landslide: the Altindag landslide site, Izmir (western Turkey) // Journal of Applied Geophysics. 2008. Vol. 65. № 2. P. 84–96.
- Vinegar H.J., Waxman M.H., Induced polarization of shaly sands // Geophysics. 1984. Vol. 49. № 8. P. 1267–1287.
- Hobbs N.B. Mire morphology and the properties and behaviour of some British and foreign peats // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 1986. Vol. 19. № 1. P. 7–80.

20. Riahi M.A., Tabatabaei S.H., Beytollahi A. Seismic refraction and downhole survey for characterization of shallow depth materials of Bam city, southeast of Iran // *Journal of the Earth and Space Physics*. 2012. Vol. 37. № 4. P. 41–58.
21. Zainorabidin A., Mohamad H.M. Preliminary peat surveys in ecoregion delineation of north Borneo: engineering perspective // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2016. Vol. 21. P. 4485–4493.
22. Zainorabidin A., Mohamad H.M. Engineering properties of integrated tropical peat soil in Malaysia // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2017. Vol. 22. №. 02. P. 457–466.
23. Zainorabidin A., Mohamad H.M. A geotechnical exploration of Sabah peat soil: engineering classifications and field surveys // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2016. Vol. 21. P. 6671–6687.
24. Loke M. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: a practical guide to 2-D and 3-D surveys*. 2000.
25. Loke M. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: a practical guide to 2-D and 3-D surveys*, Res2DInv manual. Cambridge, MA, USA: IRIS Instruments, Academic Publisher, 2001.
26. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method 1 // *Geophysical Prospecting*. 1996. Vol. 44. № 1. P. 131–152.
27. Basri K., Talib M.K.A., Ping B.P.A. et al. Comparison of dispersion image resolution acquired using multichannel analysis of surface waves with different source energy and stacking // *Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. London, UK: IOP Publishing, June 2020.
28. Basri K., Talib M.K.A., Jumien L. et al. Influence of source energy and stacking on active MASW method dispersion image // *Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Johor, Malaysia: IOP Publishing, August 2020.
29. Taipodia J., Baglari D., Dey A. Effect of source characteristics on the resolution of dispersion image from active MASW survey // *Indian Geotechnical Journal*. 2019. Vol. 49. № 3. P. 314–327.
30. Said M.J.M., Zainorabidin A., Madun A. *Data Acquisition Challenges on Peat Soil Using Seismic Refraction*. Berlin, Germany: Springer, 2015.
31. Sudha K., Israil M., Mittal S., Rai J. Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations // *Journal of Applied Geophysics*. 2009. Vol. 67. № 1. P. 74–79.
32. Ulusay R., Tuncay E., Hasancebi N. Geo-engineering properties and settlement of peaty soils at an industrial site (Turkey) // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2010. Vol. 69. № 3. P. 397–410.
33. Huat B.B.K., Kazemian S., Prasad A. et al. State of an art review of peat: general perspective // *International Journal of Physical Sciences*. 2011. Vol. 6. № 8. P. 1988–1996.
34. Wahab N., Basri K., Talib M.K.A., Rohani M.M. Segregation peat fiber and pre-consolidation pressure effect on the physical properties of reconstituted peat soil // *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. 2019. Vol. 8. № 6S3. P. 640–647.
35. Basri K., Talib N., Zainorabidin A. Sub-surface profiling using electrical resistivity tomography (ERT) with complement from peat sampler // *Civil Engineering and Architecture*. 2019. Vol. 7. №. 6A. P. 7–18.
36. Sjoberg Y., Marklund P., Pettersson R., Lyon S.W. Geophysical mapping of palsa peatland permafrost // *The Cryosphere*. 2015. Vol. 9. № 2. P. 465–478.
37. Michael L., Shane D., L'Heureux J.-S. et al. Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine clays // *Canadian Geotechnical Journal*. 2012. Vol. 49. № 10. P. 1158–1168.
38. O'Kelly B.C., Pichan S.P. Effects of decomposition on the compressibility of fibrous peat: a review // *Geomechanics and Geoengineering*. 2013. Vol. 8. № 4. P. 286–296.
39. Asadiand A., Huat B.B. Electrical resistivity of tropical peat // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2009. Vol. 14. P. 1–9.
40. Jakalia I.S., Aning A.A., Preko K. et al. Implications of soil resistivity measurements using the electrical resistivity method: a case study of a maize farm under different soil preparation modes at Knust agricultural research station, Kumasi // *International Journal of Scientific and Technology Research*. 2015. Vol. 4. № 01. P. 9–18.
41. Huat B.B. Deformation and shear strength characteristics of some tropical peat and organic soils // *Pertanika Journal of Science and Technology*. 2006. Vol. 14. №. 1-2. P. 61–74.
42. Koster K., Harting R., Middelkoop H. Characterizing void ratio and compressibility of Holocene peat with CPT for assessing coastal-deltaic subsidence // *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2018. Vol. 51. № 2. P. 210–218.
43. de Heer K., Zainorabidin A., Masirin M.I.M. et al. Estimation of shear wave velocity using 1-D multichannel analysis of surface waves (MASW) and shear modulus of peat // *Malaysian Construction Research Journal*. 2018. Vol. 24. № 1. P. 1–10.
44. Mohamad H.M., Zainorabidin A., Razali S.N.M., Zolkefle S.N.A. Assessment for applicability of microwave oven in rapid determination of moisture content in peat soil // *Journal of Engineering Science and Technology*. 2020. Vol. 15. № 3. P. 2110–2118.



АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ»

ГЕОТЕХНИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

Лаборатория оснащена отечественным и зарубежным оборудованием последнего поколения по всем направлениям деятельности лаборатории: испытания дисперсных, скальных, мерзлых грунтов и геокомпозитов.

На постоянной основе работают курсы повышения квалификации для экспертов в области геотехники.

Организован постоянный доступ супервайзеров и общедоступная онлайн трансляция работы лаборатории на портале Геоинфо и сайте лаборатории.



MDGT.RU



ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И КРИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ «ТАЕЖНОГО» ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ **В ЮЖНОЙ ЯКУТИИ**

ШАЦ МАРК МИХАЙЛОВИЧ
Ведущий научный сотрудник ФГБУН
Институт мерзлотоведения
им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, к.г.н.
mmshatz@mail.ru.

В статье описаны географические, климатические и геологические условия района месторождения «Таёжное», освещены инженерно-геологические особенности участка, выявлены наиболее опасные экзогенные процессы: морозное пучение и сейсмичность. Прослежена история геологического изучения территории. Показаны причины многолетних задержек с освоением и отработкой месторождения, его ближайшие перспективы.

Введение ▶

В Южной Якутии, наряду с ранее выявленными минеральными ресурсами нефти, газа, угля, цветных и драгоценных металлов, обнаружены и разведаны многочисленные значительные, а порой и уникальные по объемам запасов железорудные месторождения. Однако промышленность черной металлургии, в отличие от вышеназванных полезных ископаемых, здесь пока развития не получила. Это положение связано с проблемами, переживаемыми экономикой региона и страны в целом.

Тем не менее, вовлечение железорудных месторождений в промышленное использование представляется важным фактором социально-экономического развития этой пока еще мало освоенной части Сибири. При этом возникает необходимость выявления методов и подходов эффективного промышленного освоения крупных запасов железных руд и создания в реальной перспективе на их базе объектов черной металлургии. Решение этой проблемы возможно лишь на основе комплексного геолого-экономического анализа и оценки рентабельности разработки наиболее крупных месторождений, базирующихся на оперативной информации о геологических, горнотехнических, экономических, инфраструктурных и других условиях районов освоения.

Результатом подобных исследований обычно является обоснование экономической целесообразности освоения ряда первоочередных наиболее эффективных месторождений, а также определение важнейших технико-экономических показателей их промышленного освоения.

Вместе с тем, учитывая современные экономические сложности и острый дефицит инвестиций в экономику, в статье рассмотрены возможности привлечения для освоения и эксплуатации месторождений иностранного капитала, например, из таких ближайших к этой части России стран, как Япония, Китай и Южная Корея, которые испытывают дефицит в собственном железорудном сырье и свою потребность в нем удовлетворяют в основном за счет импорта.

Наличие на Дальнем Востоке России крупных разведанных месторождений железных руд в сочетании с расположением неподалеку огромных залежей высококачественного каменного угля становится благоприятной сырьевой базой для создания черной металлургии региона и серьезным фактором развития его экономики.



Рис. 1. Естественные геосистемы участка месторождения. Фото И.В. Дорофеева

Однако при решении вопроса освоения этих месторождений в современных рыночных условиях сложившаяся уникальная экономико-сырьевая ситуация по ряду объективных и субъективных моментов была неоправданно усложнена. В результате вот уже более 20 лет проекту активного и масштабного освоения ряда железорудных месторождений Южной Якутии должного внимания не уделяется и конца подобной ситуации не видно.

Цель статьи дать комплексную оценку геолого-географических условий освоения одного из богатейших месторождений региона – «Таежного» с акцентом на мерзлотно-гидрогеологическую информацию, обуславливающую методы и подходы его геотехнологической отработки.

Природные условия железорудного месторождения «Таёжное»

 ▶

При подготовке данного раздела использованы следующие источники [2-7,9,11-15,17-21].

Одним из крупнейших в РФ по запасам является железорудное месторождение «Таёжное», расположенное в Нерюнгринском районе Республики Саха (Якутии), в 100 км к югу от города Алдан и в 4 км к востоку от разъезда «Таежный» железной дороги Беркакит-Томмот-Якутск.

Связь с месторождением может осуществляться по Амуро-Якутской автомагистрали и по автодороге на пос. Канкунский, которая проходит по территории будущей промплощадки. Возможно и строительство подъездного железно-

дорожного пути, примыкающего к станции «Таежная».

Месторождение «Таежное» расположено в восточной части Олекмо-Тимптонской плоскогорной провинции, которая характеризуется развитием горно-таежных и горно-редколесных ландшафтов (рис.1) с островным и прерывистым распространением многолетне-мерзлых пород (ММП).

Горно-редколесный ландшафт определяется преобладанием лиственничных редин и редколесий, широко развитых на горных хребтах и плоскогорьях. В напочвенном покрове обычны лишайники, зеленые мхи и кустарнички, в подлеске – кустарниковые березки, ольховник, кедровый стланик.

Горно-таежный ландшафт характеризуется распространением лиственничных и сосново-лиственничных лесов кустарничково-зеленомошных и лишайниковых.

Орографически месторождение находится в пределах Алданского нагорья, имеет среднегорный полого увалистый рельеф, осложненный отдельными горными вершинами с абс. отм. 1380 м и сетью неглубоко врезанных с пологими склонами речных долин. Абсолютные отметки поверхности собственно на Таежном месторождении составляют 1180-1285 м, а речных долин – 1000-1150 м. Рельеф горный с пологими возвышенностями и широкими заболоченными долинами, сочетающийся с плоскогорьями и тектоническими впадинами. Водоразделы местных возвышенностей плоские и куполовидные при крутизне склонов речных долин от 3 до 20°. Монотонный выдержанный рельеф часто нарушен

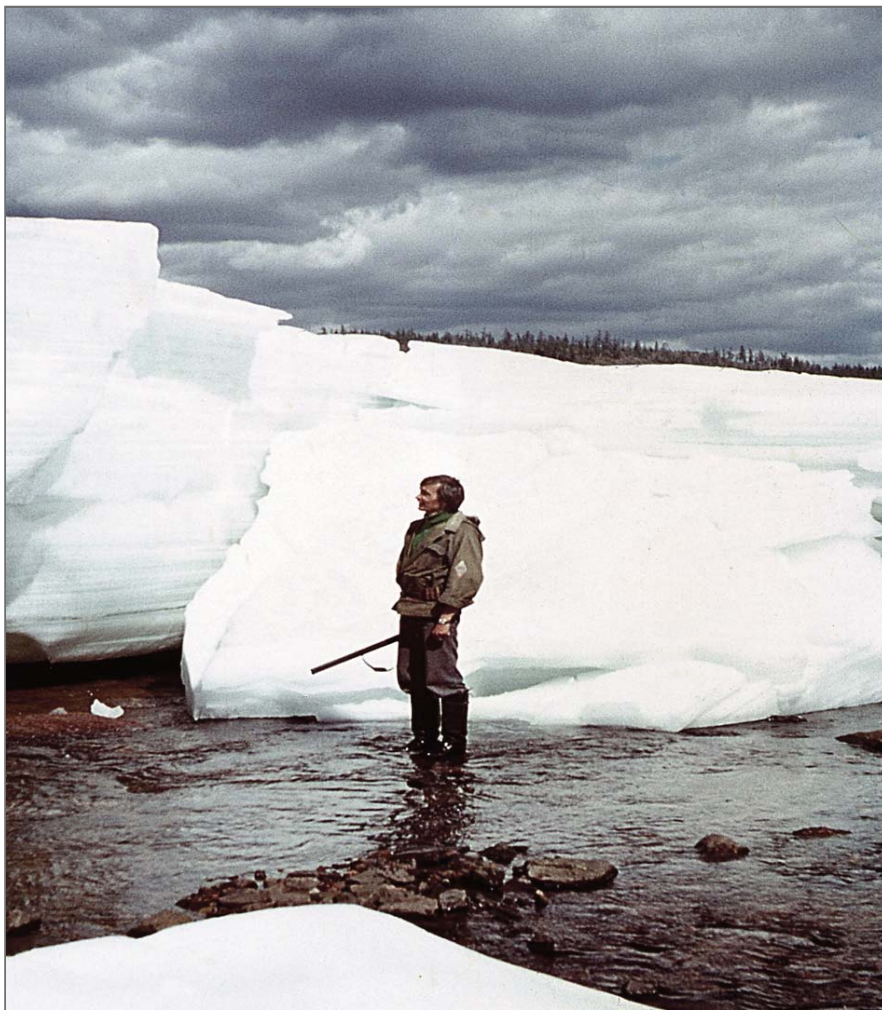


Рис. 2. Наледь Леглегерская. Фото Н.П. Кривошеева

скальными выходами интрузивных горных пород в виде одиночных и групповых останцов высотой до 14 м.

Речная сеть участка Таежный относится к бассейнам р. Алдана (реч. Аччгыгый-Нимныр с притоками) и р. Тимптона (реч. Улахан - Леглегер и реч. Аччгыгый-Леглегер с притоками), представлена верховьями практически всех вышеперечисленных водотоков. Собственно лицензионный участок занимает водораздельную территорию между этими водными системами. Долины рек имеют небольшой врез – от 30 до 250 м, пологие, редко – средней крутизны борта. Практически во всех водотоках зимой формируются наледи, достигая в отдельных случаях 3-5 км в длину при мощности льда до 4-5 м. Особенно широко известна знаменитая Леглегерская наледь (рис.2).

Питание водотоков происходит преимущественно за счет весеннего снеготаяния и летне-осенних дождей, причем подземные воды в общем балансе поверхностного стока играют не основную роль. Сток неравномерен – до 75-90% его общего объема приходится на

лето, а зимой на большинстве водотоков сток почти полностью прекращается в связи с перемерзанием водного потока, часто являющегося причиной образования русловых наледей.

Виду расчлененного рельефа озерная сеть выражена слабо и в основном приурочена к верховьям речных долин. Берега озер, как правило, заболочены и подвержены термокарстовой переработке.

Климат района резко-континентальный со значительными колебаниями температур воздуха. Среднегодовая температура воздуха непосредственно на участке месторождения составляет -9,5°C. Минимальная температура воздуха понижается до -63°C, а максимальная летом достигает 34°C. Среднегодовое количество осадков составляет 450-550 мм при толщине снежного покрова 1 м.

Глубокое промерзание и оттаивание пород определяют интенсивное развитие физического выветривания, которому способствуют активно протекающие процессы эрозии и тектоническая трещиноватость горных пород.

Многочисленные тектонические нарушения играют особую роль в геологическом строении в пределах Таежного участка, а также в формировании его геокриологических и гидрогеологических условий. Наибольшей тектонической активности территория подвергалась в мезозойское время, когда было заложено большинство разломов, сыгравших в последующем огромную роль в формировании современного рельефа. Продолжение тектонической деятельности в более позднее время привело к образованию многочисленных зон дробления. Среди разломов выделяется несколько систем различных простираний с преобладанием тектонических нарушений северо-восточного, северо-западного и субширотного направления. С зонами дизъюнктивных нарушений связана линейная кора выветривания, которая в плане представляет рисунок омоложенных разломов.

Таёжное месторождение находится в центральной части Алданского щита в Леглиерском железорудном районе и структурно приурочено к межкупольному Унгра-Тимптонскому прогибу, ограниченному разломами и выполненному образованиями раннедокембрийской дес-леглиерской серии с суммарной мощностью 2300-3100 м. В составе серии преобладают метавулканиды основного состава, подчинённое значение имеют интрузивные и метаморфизованные осадочные породы.

Залежи железных руд месторождения локализованы в леглиерском продуктивном горизонте мощностью 320 м с отдельными выходами на поверхность. В составе горизонта выделены три пачки: нижняя рудная (120-200 м), гнейсовая межрудная (40-80 м) и верхняя рудная (до 120 м). В нижней части рудной пачки находится «Главная» рудная залежь, включающая линзовидные прослои амфибол-пироксеновых кристаллических сланцев и амфибол-биотитовых гнейсов мощностью до 5-15 м. Иногда межрудные прослои сложены доломитовыми мраморами.

Межрудная пачка представлена различными по составу гнейсами, а верхняя сложена диопсид-биотитовыми гнейсами, чередующимися с маломощными пластами и короткими линзами доломитовых мраморов, диопсидовых, диопсид-флогопитовых пород и силлиманит-биотитовых гнейсов. Она включает 10 крупных рудных тел длиной 400-800 м при мощности 30-50 м. Преобладающим типом руд на месторождении (около 80% запасов) являются маг-

нетитовые ортосиликатные с массивной и вкрапленной текстурой. Магнетит представлен двумя генерациями. Первая (до 95%) – изометричные, овальные на контакте с сульфидами зёрна толщиной 0,5-2 мм. Вторая (до 5%, редко более) образует тончайшие жилки в псевдоморфозах серпентина по форстериту и клиногумиту, либо ашарита по лювигиту в комплексных борато-магнетитовых рудах. Среди сульфидов преобладает пирротин, реже пирит и халькопирит, сфалерит и молибденит. Содержание железа в рудах колеблется от 20 до 60%, много сульфидной серы, но редок фосфор. Руды легко обогащаются путем двухстадийной магнитной сепарации с извлечением 94% железа в концентрат с содержанием железа 62-64%. Сера успешно удаляется при необходимой для всех типов руд агломерации.

Четвертичные отложения представлены аллювием, элювием, склоновыми, озерно-болотными и другими молодыми отложениями. К нижнему отделу четвертичной системы относится аллювий высоких (60-80 м) террас местных водотоков [19].

Средне-четвертичные отложения представлены валунно-галечным аллювием террас 40-50 м уровня и ледниково-солифлюкционными образованиями. Элювиальные горизонты водоразделов представлены главным образом щебнистыми суглинками с меняющимися соотношениями глинистого и щебнисто-глыбового материала, мощностью до 1-2 метров (редко – больше), а также склоновым гетерогенным комплексом из руслового и пойменного аллювия, озерно-болотных и техногенных отложений.

В целом характер геологического разреза пород района Леглергерского рудного поля свидетельствует о том, что в течение всего поздне-кайнозойского времени территория испытывала поднятия, вследствие чего происходило удаление ранее образовавшихся континентальных отложений и замещение их молодыми маломощными осадками, соответствующими лишь самым последним фазам геологической истории [19].

На месторождении также развита борная минерализация лювигитового типа. Среди первичных боратов преобладает лювигит (с железистостью 25-40%). Кроме этого, в кальцифирах неравномерно распределены суанит, сингалит и варвикит. В скарнах изредка встречаются флюоборит и варвикит. Широко развито замещение первичных боратов ссайбелиитом. Кроме боратов

широко развиты в скарнах серендитит и турмалин; редко встречаются аксинит, даголит и данбурит. Последние два минерала пространственно связаны с проявлениями магматизма мезозойского времени.

Как и на многих других железорудных месторождениях, на «Таежном» имеются вкрапления боратовых руд, а сам бор в малых дозах присутствует в растениях и организмах всех животных и человека. Запасы В₂O₃ (категории С2) месторождения составляют 3993 тыс. т (11,5% российских), при среднем содержании В₂O₃ в рудах – 3,20%.

Соединения бора активно используются в быту, в частности, входят в состав большинства современных чистящих средств. Присутствуют соединения бора и в хрустальных изделиях — люстрах, вазах, бокалах. Недостаток бора, равно как и его избыток одинаково вредны для всей флоры и фауны. Поэтому для исключения вреда необходимо применить весь накопленный опыт горнорудных компаний мира по защите от потенциального экологического ущерба.

«Таежный» расположен на юге Восточно-Сибирской артезианской области в пределах структуры I-го порядка – Алданского гидрогеологического массива и принадлежит структуре 2-го порядка – Алдано-Тимптонскому гидрогеологическому массиву с наложенным водоносным комплексом кристаллических пород архея [6,7,18.19].

В пределах месторождения «Таежное» распространены:

- водоносный горизонт четвертичных отложений;

- водоносный комплекс трещинных и трещинно-жильных вод коренных пород.

Водоносный горизонт четвертичных отложений в обводнении проектируемого карьера практического значения иметь не будет. Режим подземных вод сезонный, зимой эти воды полностью промерзают. Подземные воды архейских кристаллических пород являются наиболее распространенными, они безнапорны, глубина залегания уровней, в зависимости от рельефа и времени года, колеблется от 5 м до 70 м.

В зоне развития ММП воды приобретают напор до 100 м, а мощность водоносного комплекса колеблется от 250 м до 70 м. Коэффициент фильтрации колеблется в пределах от 0 до 1,5 м/сут.

Трещинно-жильные воды приурочены к разломам, мощность которых достигает 30-60 м, они напорны, величина напора выше поверхности земли. Коэф-

фициент фильтрации водовмещающих пород разломов достигает 0,8 м/сут, а питание трещинных и трещинно-жильных вод осуществляется за счёт инфильтрации атмосферных осадков.

По химическому составу воды гидрокарбонатные и сульфатно-гидрокарбонатные кальциево-магниевого, а по степени минерализации трещинные подмерзлотные воды (по данным гидрогеологической экспедиции ПГО «Якутскгеология») близки к надмерзлотным и межмерзлотным, служащим источником их питания [19].

Многолетняя мерзлота на участке «Таежного» железорудного месторождения имеет преимущественно прерывистое по площади и сплошное по вертикали распространение. Глубина залегания верхней поверхности ММП находится в основном в пределах 0,7-3,0 м и определяется величиной его сезонного протаивания.

Мощность многолетнемерзлой толщи (ММТ) изменяется от первых до 250-300 м и более при среднегодовой температуре у подошвы слоя ее годовых колебаний (10-15 м) от 0 до минус 3-4°С и ниже. Температура талых пород обычно редко превышает + 2°С, оставаясь в средних значениях от 0,5 до 1,5°С. Глубина сезонного промерзания изменяется в значительных пределах от 2 до 6-8 м.

Именно в этом районе в процесс геокриологических исследований ИМЗ СО РАН были выявлены чрезвычайно высокие темпы преобразования ММП при освоении железорудного месторождения «Таежное». По результатам наземных и дистанционных исследований, площади развития мерзлых пород возросли на 15-20%, мощность на 20-40 м, а температура на глубине 12 м понизилась на 0,6°С, отражая тем самым существенное увеличение суровости мерзлотных условий.

Подобные достаточно активные и масштабные изменения связаны с нарушениями, а порой и уничтожением напочвенных покровов, приводящим в местных климатических условиях к перераспределению снежного покрова и изменению условий теплообмена верхних горизонтов горных пород с приземными слоями атмосферы.

Экзогенные геологические явления в районе месторождения в основном относятся к категории криогенных и весьма разнообразны. Основными факторами, обуславливающими глубину сезонного промерзания в данном районе в естественных условиях, являются мощный рыхлый снежный покров, небольшая



Рис. 3. Технологическая дорога на месторождении. Фото с электронного ресурса [16]

влажность пород, а также низкие зимние температуры воздуха. Сезонное протаивание грунтов в основном зависит от характера растительного покрова, состава и влажности пород, а также от высоких летних температур воздуха. На основной части территории характер рыхлых отложений благоприятствует активной инфильтрации значительных, прогретых, жидких осадков, что может привести к возрастанию глубин сезонного протаивания грунтов на 15-20% [19].

Неблагоприятные экзогенные процессы отрицательно влияют на строительство и эксплуатацию различных объектов. К их числу в первую очередь следует отнести морозное выпучивание каменного обломочного материала на склонах местных возвышенностей, криогенное пучение рыхлых грунтов при промерзании. В речных долинах многочисленны наледи, одна из которых – Леглегерская – достигает в длину нескольких км при мощности льда до 3-4 м. Чаше отмечаются наледи средних размеров, площади отдельных экземпляров достигают 200 000 м². Относительная наледность этого района составляет 0,27%. Ухудшает инженерно-геологические условия и сейсмичность площадки.

История изучения месторождения ▶

Месторождение «Таёжное» было разведано еще во времена СССР, однако его разработка до сих пор не началась. Геологическое изучение района работ стартовало с конца 40-х годов, когда работниками ЯФАН СССР была выявлена Леглиерская аномалия, а в 1949 г. на-

земными выработками были оконтурены магнетит-флогопитовые рудные тела, получившие впоследствии название Таежного месторождения [5]. С весны 1950 г. «Якутская комплексная экспедиция» выполнила поисково-разведочные буровые работы в пределах рудного поля Таежного месторождения. За период 1950-1958 гг. группой железорудных отрядов этой экспедиции были проведены: геолого-петрографические, минералого-геохимические и генетические исследования железорудных месторождений и железорудных зон. Позднее на месторождении продолжались геолого-разведочные работы. Первая мерзлотная инженерно-геологическая съемка района месторождения была выполнена в 1977 г. комплексной экспедицией в масштабе 1:25000. По материалам данной съемки были выделены инженерно-геологические районы, произведено описание грунтов, приведены сведения о подземных водах, криогенных, физико-геологических явлениях.

В 1977 г. на месторождении были выполнены инженерно-геологические изыскания. Целевым назначением работ являлось изучение общего геологического строения участка и определение физико-механических свойств грунтов.

В 2003 г. ОАО «ЯкутГИСИЗ» выполнило инженерно-геологические изыскания для разработки рабочей документации, а в 2011 году провел инженерные изыскания, включающие геофизические работы для оценки степени сейсмической опасности площадки месторождения. В 2007 г. ОАО «ЮВГК» были изучены гидрогеологические условия территории Таёжного месторождения.

В 2007 г. изучение мерзлотных свойств горных пород Таёжного месторождения было выполнено Институтом мерзлотоведения СО РАН [9]. Целью исследований являлись сбор и обобщение геотермической информации по месторождению, создание электронной базы данных, определение теплофизических и физико-механических свойств горных пород.

Современное состояние проекта ▶

В настоящее время Таежное месторождение железных руд является наиболее подготовленным к промышленному освоению. Оно характеризуется наиболее оптимальными технико-экономическими показателями, а верхняя часть залежей месторождения до глубины 600 метров может быть отработана открытым способом одним карьером, что весьма выгодно в экономическом отношении.

В пределах рудного поля Таежного месторождения заложена сеть технологических дорог (рис. 3). Известны также около десяти неизученных месторождений, что делает его еще более перспективным. Общие запасы и прогнозные ресурсы Таежно-Леглегерской группы месторождений составляют 2,1 млрд тонн железной руды, из них 1,18 млрд тонн пригодны для открытой добычи [2-4].

Разведанные запасы железных руд «Таёжного» на 01.01.2014 г. категорий А+В+С1 составляли 798,2 млн т. при среднем содержании железа в рудах 39,5%, а предварительно оценённые – 590,4 млн т. Три четверти запасов заключено в «Главном» рудном теле, протяжённостью 3,5 км и мощностью от 47 м до 57 м. Месторождение является одним из крупнейших резервов железных руд в России, его можно в относительно короткие сроки вовлечь в разработку.

Лицензией на разработку месторождения владели ОАО «Горно-металлургическая компания «Тимир» и компания «Евраз Групп», но до сих пор оно не разрабатывается, что вызывает недовольство руководства Якутии [1,8,10]. Периодически возникает вопрос об отзыве лицензии, т.к. у владельцев до сих пор нет четкой позиции по реализации проекта по добыче железной руды. Проблема обсуждалась на совещании у зампреда правительства РФ Юрия Трутнева, но своего решения так и не получила.

Руководство железорудной ГМК «Тимир» до сих пор не озвучило четкие параметры разработки «Таежного», по сути отказывается от прежних масштабных

планов строительства металлургического комбината в республике. В то же время эксперты отмечают, что найти других инвесторов для проекта будет сложно.

Владельцу лицензии на «Таежное» ГМК «Тимир» принадлежат также аналогичные права на еще три месторождения в Якутии — «Десовское», «Тарыннахское» «Горгитское» с совокупными запасами 3,6 млрд тонн, что еще более усложняет ситуацию. Изначально проект «Тимир» предполагал строительство двух ГОКов общей мощностью 18 млн тонн концентрата в год и Нерюнгринского металлургического комбината мощностью до 6,1 млн тонн стали в год. Но эти планы составлялись в 2008 году, еще до кризиса и на пике цен на продукцию отрасли, поэтому позже серьезно изменились.

В последнее время появились новые, хотя и неопределенные перспективы освоения «Таежного», связанные с потенциальным крупным инвестором в угольную и железорудную промышленность Южной Якутии – китайской металлургической компанией ООО «Торгово-промышленная корпорация Хэбэй-Би Ши» [16], которая была основана в 2007 году как единая крупномасштабная современная частная компания в КНР. Представляет собой объединение сталелитейной, коксовой, электрической, горной промышленности, недвижимого имущества, финансово-коммерческой деятельности с фиксированными активами в размере 18 млрд юаней. Годовая выработка стали на предприятиях корпорации составляет 6,8 млн тонн, кокса – 3 млн тонн, железного порошка – 3 млн тонн, электроэнергии – 2,5 млрд

киловатт/час. Для сравнения: Нерюнгринская ГРЭС вырабатывает около 3 млрд киловатт/час в год, то есть, мощности вполне сопоставимы.

Визиту в Южную Якутию в апреле 2019 г. предшествовала встреча 14 сентября 2018 года главы Приморья Андрея Тарасенко и председателя совета директоров китайской корпорации Би Цзиньань, включающая подписание соглашения о строительстве в Приморском крае, недалеко от морских портов Владивостока, металлургического завода стоимостью около 3,4 млрд рублей.

Этот завод нужен в первую очередь приморцам. Там в ближайшей перспективе планируется создать кластер судостроения, а также реализовать множество новых строительных проектов, поэтому в регионе будут крайне востребованы судовая сталь и арматура из железа. Но в Приморском крае нет таких месторождений, как в Нерюнгринском районе Якутии, а современные технологии позволяют извлекать металл не только из богатых, но и из бедных пород.

Еще в 1974 году предполагалось создать в Южной Якутии крупнейшую металлургическую базу со строительством металлургического комбината на Таежном месторождении железной руды. Именно этим объясняется главный интерес китайских специалистов, которым требуется сырье для сталелитейного завода в Приморье, а они находятся в Таежном месторождении железной руды. Кроме того, неподалеку имеется ещё Десовское железорудное месторождение с балансовыми запасами 400,7 млн тонн со средним содержанием металла 26,7% [16].

Суммарные запасы двух основных железорудных месторождений Южной Якутии позволят горнодобывающему комплексу осуществлять добычу угля открытым способом свыше 40 лет, а далее в течение 60-70 лет проводить подземную доработку месторождений.

Учитывая технологию сталелитейного производства, в котором не обойтись без высококачественного кокса и концентрата, китайских партнеров особо интересовали качественные показатели нерюнгринского угля и они были ими вполне удовлетворены. Таким образом перспективы освоения двух якутских железорудных месторождений вполне реальны.

Заключение ►

Таежное месторождение железной руды находится в труднодоступном регионе с экстремально суровыми природными условиями. В сочетании с происходящим в последние годы в условиях рынка ужесточением экономических требований к рентабельности промышленного освоения, это в значительной степени сдерживает разработку месторождения.

В то же время «Таежное» обладает крупными разведанными и прогнозными запасами железных руд и может рассматриваться как перспективная потенциальная сырьевая база создания в Южной Якутии горно-обогатительной промышленности с акцентом на развитие черной металлургии. По комплексу критериев в число шести наиболее благоприятно географически расположенных и крупных месторождений Сибири для первоочередного освоения было рекомендовано и Таежное месторождение. **и**

Список литературы ►

1. Анатолий Джумайло Под «Тимиром» дрогнула руда. Якутские власти недовольны работой компании//Коммерсантъ, 27.01.2016. С.34-41.
2. Архипов Г.И. Минеральные ресурсы горнорудной промышленности Дальнего Востока. Обзор состояния и возможности развития. М.: Горная книга, 2011. 830 с.
3. Архипов Г.И. Горнорудная промышленность. Минеральные ресурсы России // Экономика и управление. 2013. No 5. С. 164-175.
4. Архипов Г.И. Территориально-корпоративная организация горнорудной промышленности Дальнего Востока // География и природные ресурсы. 2015. No 1. С. 135-141.
5. ВИКИПЕДИЯ. Электронный ресурс. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B0%D1%91%D0%B6%D0%BD%D0%BE%D0%B5_\(%D0%BC%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B6%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B0%D1%91%D0%B6%D0%BD%D0%BE%D0%B5_(%D0%BC%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B6%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5)). Дата обращения: 11.11.2018.
6. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 414 с.
7. Геология СССР. Т. XVIII. Якутская АССР. Полезные ископаемые. – М.: Недра. 1979. – 411 с.
8. "Евраз Групп" может лишиться лицензии на "Таежное". Электронный ресурс. URL:<http://xn--80aa3bndv5cq.xn--p1ai/157708.html>. Источник: SakhaNEWS. Дата обращения: 22.06.2018.
9. Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. – Н-ск: Изд-во «Наука» СО РАН, 2005. – 227 с.

10. Ирина Васильева. Строительство Таежного ГОКа станет первым шагом в освоении рудных запасов Южной Якутии. Электронный ресурс. URL: <https://rg.ru/2011/09/29/reg-dvostok/taezhnoe.html>. Источник: <https://rg.ru/>. Дата обращения: 23.07.2018.
11. 11. Лейдерман Л.Е., Темникова М.С., Чистякова Е.В. и др. Освоение Таежного месторождения железной руды: синергия экологии и бизнеса// Рациональное освоение недр. 2015, №2, С.68-74.
12. Лисицын А.Е., Руднев В.В., Гафт А.Л., Добровольская Н.В., Дара О.М., Ткачева Т.В. Новые данные о людвигите и ашарите Таежного скарно-магнетитового месторождения (Южная Якутия) // ЗВМО. 1985. Часть 114. Вып. 1, С. 62-72.
13. Малинко С.В., Ямнова Н.А., Пушаровский Д.Ю., Лисицын А.Е., Руднев В.В., Юркина К.В. Железистый варвикит из месторождения Таежное (Южная Якутия). - ЗВМО, 1986, №6, С. 717-723.
14. Маракушев А.А. Петрология Таежного железорудного месторождения в архее Алданского щита. Магадан: Кн. изд-во, 1958. - 122 с.
15. Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР масштаба 1:2 500 000. – М.: ГУГК, 1991. – 2 л.
16. Олег СОЛОДУХИН. Китайцы строят «железные планы» в Южной Якутии. Электронный ресурс. URL: <http://news.myseldon.com/ru/news/index/209004930>. Дата обращения: 16 апреля 2019 г.
17. Перцев Н.Н., Кулаковский А.Л. Таежное месторождение. - Геология рудных месторождений, 2002, т. 44, № 1, с. 3-21.
18. Фотиев С.М. Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угленосного бассейна. М., "Наука", 1965, 127 с.
19. Южная Якутия. Мерзлотно-гидрогеологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района. Под ред. Кудрявцева В.А. Москва : Изд-во МГУ, 1975. – 444 с.
20. Grew E.S., Pertsev N.N., Boronikhin V.A., Borisovskiy S.E., Yates M.G., Marquez N. (1991) Serendibite in the Tayozhnoye deposit of the Aldan Shield, eastern Siberia, USSR, - Am. Min., 76, 1061-1080
21. Schreyer, W., Pertsev, N.N., Medenbach, O., Burchard, M., Dettmar, D. (1998) Pseudosinhalite: discovery of the hydrous MgAl-borate as a new mineral in the Tayozhnoye, Siberia, skarn deposit. Contributions to Mineralogy and Petrology (1998): 133: 382-388.

Телеграм-канал журнала

Независимый электронный журнал
Геоинфо

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

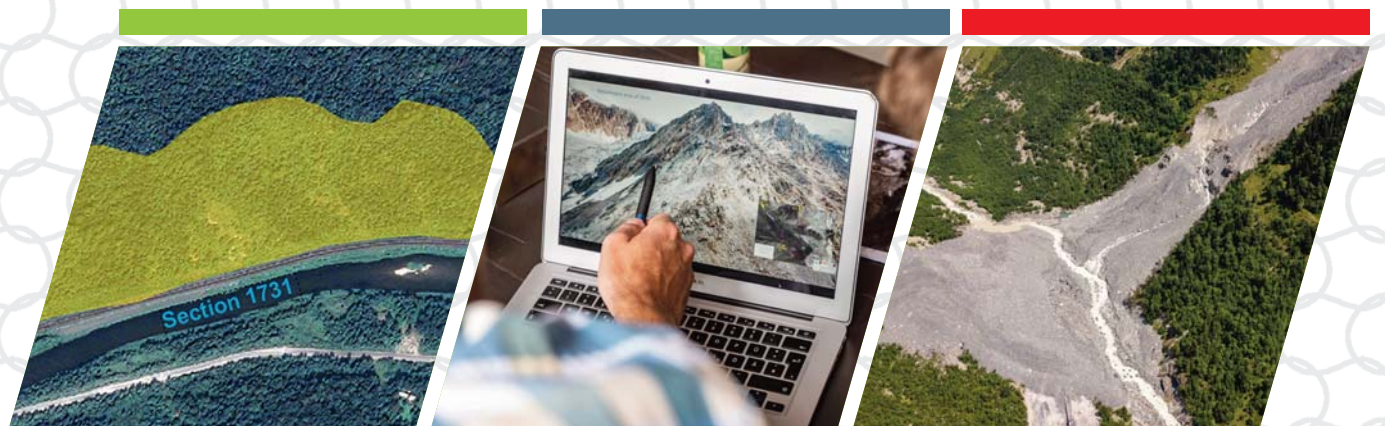


Mountain
Risk
Consultancy

ЗАЩИТА ОТ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И СНИЖЕНИЕ РИСКОВ ПОСЛЕДСТВИЙ КАТАСТРОФ



- РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ
- КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ
- ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ И КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ЗОНИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
- ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ
- РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И МОНИТОРИНГ



Skype: Mountain Risk Consultancy
E-Mail: office@mountain-risk.ru
<https://www.mountain-risk.ru>





ПЕРСПЕКТИВЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ В МЕНЯЮЩЕМСЯ КЛИМАТЕ: **ТРЕБУЕТСЯ РЕШЕНИЕ** **ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЗАДАЧ**

АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА

Согласно данным, которые в октябре опубликовал Росгидромет, уже в ближайшие годы нашу страну ждут серьезные проблемы, связанные с повышением температуры окружающей среды. Это приведет к таянию многолетнемерзлых грунтов и потере несущей способности оснований сооружений, увеличению числа катастрофических событий, таких как ураганы, смерчи, обильные осадки, наводнения и засухи. Это также станет причиной увеличения числа проявлений опасных геологических процессов. На самом деле, все это происходит уже сейчас.

Начинать бороться с этим, чтобы предотвратить массовые масштабные аварии, а не ликвидировать их последствия, необходимо уже сейчас.

В октябре Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) выпустила общее резюме «Третьего оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации». В документе проанализированы происходящие и ожидаемые изменения климата и последствия этих изменений для крупных городов РФ, а также российской Арктики. И, конечно, самые серьезные вызовы будут стоять именно перед строительной отраслью. Потому что в относительно короткой перспективе из-за таяния вечной мерзлоты северные российские города могут разрушиться. Та же участь ждет и многие инфраструктурные объекты, в том числе нефте- и газопроводы, автомобильные и железные дороги. При этом авторы особо подчеркивают, что к росту ущерба будет приводить не повышение температуры как таковое, а возрастающая уязвимость инфраструктуры, связанная с ее износом, несоблюдением строительных норм и правил, а также с освоением территорий, находящихся в сложных природно-климатических условиях.

Попробуем выделить из представленного документа самые интересные и важные факторы, которые будут оказывать влияние на развитие строительного комплекса страны, а также показать значение ожидаемых изменений.

Что происходит с климатом ▶

Как отмечается в докладе со ссылкой на Всемирную метеорологическую организацию, период 2015-2020 гг. был самым теплым шестилетием, а 2011-2020 гг. – самым теплым десятилетием за всю историю наблюдений. Современная средняя глобальная температура приземного воздуха составила примерно 14,9°C, что на 1,2°C выше, чем в доиндустриальную эпоху (рис. 1). Средние темпы потепления приземного воздуха в течение 1976-2020 гг. составили 0,18°C/10 лет в глобальном масштабе, и только за этот период глобальная температура выросла на 0,8°C. Особенно быстро температура повышалась в Северной полярной области, где за 30 лет (1991-2020 гг.) линейный рост среднегодовой температуры составил около 2,64°C.

Самое важное, что во всех сценариях повышения температуры, которые рассматриваются учеными, присутствует заметное уменьшение снежного покрова в Северном полушарии и, соответственно, связанное с этим сокращение

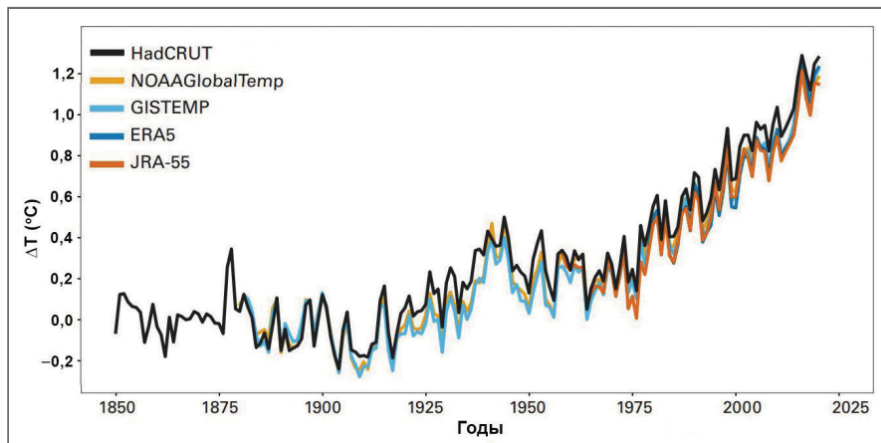


Рис. 1. Отклонение среднеглобальной температуры приземного воздуха (°C) от среднеглобальной в доиндустриальный период (1850-1900 гг.) по данным пяти архивов: HadCRUT (Великобритания), NOAA GlobalTemp (NOAA, США), GISTEMP (NASA, США), ERA5 (ECMWF, Европейский Союз), JRA-55 (Япония) (ВМО, 2021). Разброс между пятью комплектами данных в 2021 году равен 0,15°C, при этом самое низкое (1,05°C) и самое высокое (1,20°C) значения превысили на 1°C показатели доиндустриального базового периода

площадей, покрытых многолетней мерзлотой. Ее деградация будет происходить достаточно быстро и прямо зависеть от того, какой сценарий повышения температуры будет реализовываться. Уже в течение ближайших 20-30 лет площадь приповерхностной ММП в России может сократиться на 30%.

Негативное влияние изменений на российскую промышленность ▶

Как отмечается в отчете, в большинстве районов добычи углеводородов более половины аварий так или иначе связаны с метеорологическими факторами. В первую очередь это связано с уменьшением несущей способности многолетнемерзлых грунтов из-за их таяния. Разрушаются или деформируются скважины и трубопроводы, транспортная инфраструктура. Учащаются оползневые и селевые процессы. Среди других проблем исследователи называют также коррозионные повреждения из-за роста коррозионной агрессивности атмосферы, увеличение ветровых нагрузок и образование смерчей, повышение числа лесных пожаров, резкие перепады температур, абразию берегов.

Если говорить о горнодобывающей промышленности, в частности, о добыче полезных ископаемых в карьерах и шахтах, то здесь наибольшую угрозу представляют потеря устойчивости склонов карьеров из-за увеличения числа и обильности дождей и затопление шахт из-за неспособности запроектированных десятилетия назад дренажных систем вывести обильно поступающую из атмосферных осадков воду.

Отдельно исследователи выделяют повышение рисков, связанных с обильными осадками, для устойчивости дамб хвостохранилищ.

Все это необходимо учитывать при эксплуатации имеющихся и проектировании новых промышленных объектов.

Задачи, стоящие перед строительным комплексом ▶

В отчете отмечается множество вызовов, которые встают перед строительной отраслью в связи с потеплением. Это, например, предотвращение ускоренного старения ограждающих конструкций зданий из-за резких перепадов температур и повышения влажности, обеспечение соответствия зданий и сооружений новым экстремальным условиям (ураганам, наводнениям и пр.), предотвращение разрушения инфраструктуры, построенной на ММП и пр.

«Трубопроводы и большинство точечных жилых и промышленных объектов в криолитозоне построены на свайных фундаментах и опорах. Несущая способность свайных фундаментов уже уменьшилась повсеместно на 20-40%, притом что запас прочности по СНиП должен быть не менее 40%. В ближайшее десятилетие на большей части криолитозоны он будет превышен, а к середине XXI века этот показатель будет превышен повсеместно.»

Перспективные оценки рисков для инфраструктуры показывают, что к середине XXI века в зону высокого риска попадают экономически важные объекты, в том числе 1590 км трубопровода «Восточная Сибирь–Тихий океан»; 1260 км магистральных трубопроводов

в ЯНАО; 280 км железной дороги Обская – Бованенково. В зону наибольшего риска попадают города Воркута и Новый Уренгой», - отмечено в документе.

Уменьшить ущерб, как считают специалисты, можно за счет инженерных мер адаптации существующей инфраструктуры и изменения норм строительства новых объектов с учетом ослабления несущей способности мерзлоты.

Заключение ▶

Подводя некоторый итог вышесказанному, хочется еще раз остановиться на грядущих проблемах. Их появление неизбежно, поэтому начинать бороться с ними необходимо уже сейчас, а не че-

рез 10 или 20 лет, когда борьба превратится в ликвидацию последствий аварий, а не их предотвращение. Важно озаботиться повышением несущей способности ММП там, где ее оттаивание приведет к разрушению многоквартирных домов или критической инфраструктуры. Возможно, уже сейчас необходимо начинать массовую реконструкцию трубопроводов, аварии на которых наносят непоправимый ущерб экологии и экономике государства, укреплять фундаменты там, где это возможно. И уж конечно учитывать в новых проектах меняющиеся условия.

Особенно хочется привлечь внимание владельцев и эксплуатантов карьеров.

Аварии будут случаться все чаще, поэтому стоит уделить пристальное внимание на существующие решения по инженерной защите откосов карьеров. Если оползень произойдет, вернее, когда оползень произойдет, ликвидация последствий обойдется в разы дороже.

Иными словами, чиновникам и предпринимателям пора начинать думать не только в масштабах 1-5 лет, пока они находятся у власти или у руля бизнеса, а на десятилетия вперед. Да, многим это непривычно, это не принесет сиюминутного дохода, но это необходимо для того, чтобы следующее поколение могло двигаться вперед, а не разбирать завалы. **и**

Независимый электронный журнал ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо»
будет выходить ежемесячно
в формате *PDF.



WWW.GEOINFO.RU



TRUMER
Schutzbauten

www.trumer.cc

Россия:
ООО «РТ Трумер»
119002, г. Москва, переулок Сивцев Вражек,
дом 29/16

Тел.: +7 915 022 75 17
E-Mail: info@trumer.ru

ЗАЩИТА ОТ ПРИРОДНЫХ ОПАСНОСТЕЙ

TRUMER Schutzbauten — ваш компетентный и опытный партнер в области обеспечения эффективной защиты от природных опасностей:

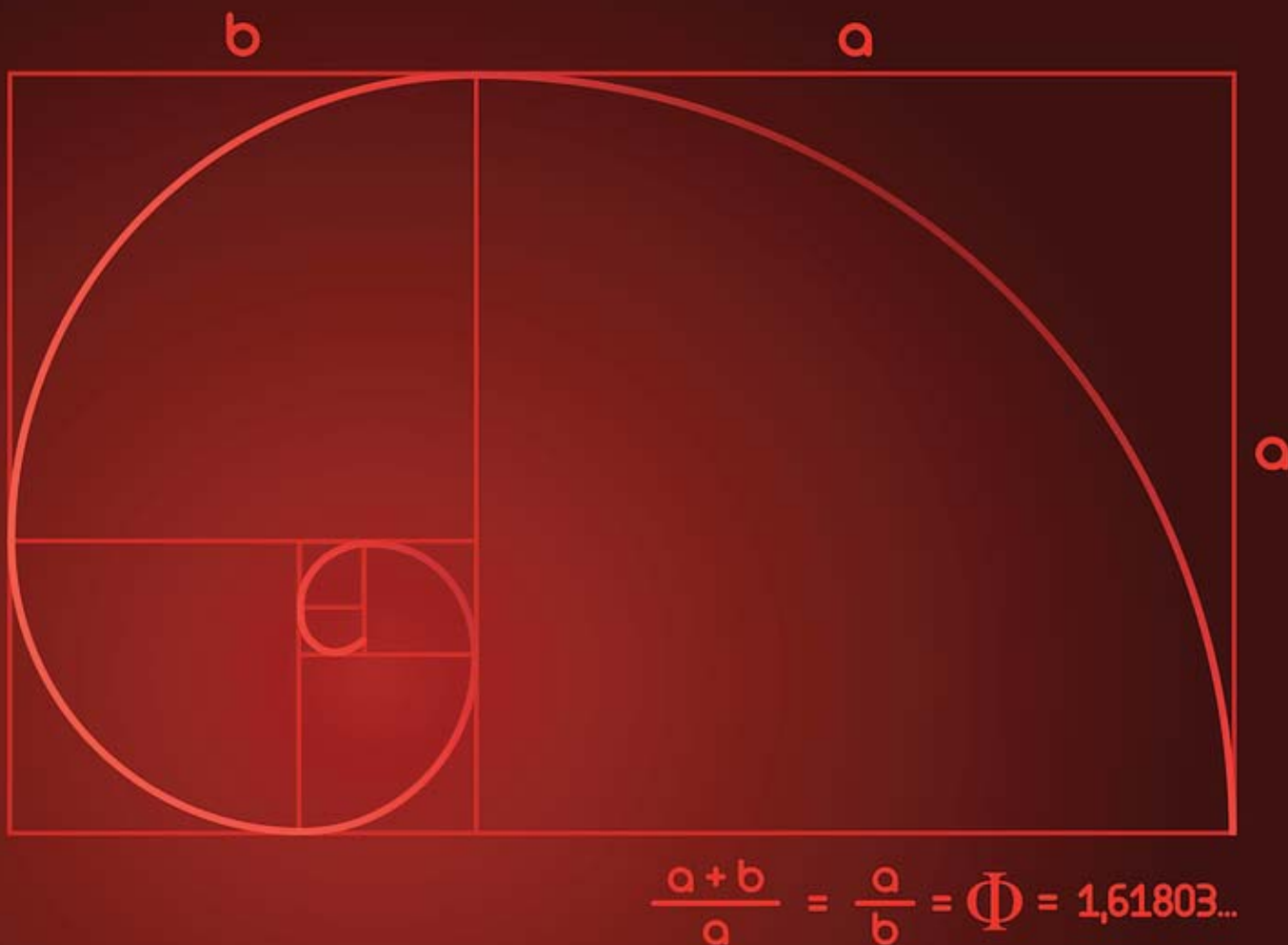
- ▶ камнепадов,
- ▶ оползней,
- ▶ селей,
- ▶ обвалов,
- ▶ лавин,
- ▶ береговой эрозии.



Следуя девизу

**«БЕЗОПАСНОСТЬ, ОБЕСПЕЧЕННАЯ ПРОФЕССИОНАЛАМИ, —
БЕЗОПАСНОСТЬ БЕЗ КОМПРОМИССОВ»,**

компания ТРУМЕР разрабатывает и реализует надежные,
эффективные и экономичные решения.



О «ЗОЛОТОМ СЕЧЕНИИ» В ГЕОЛОГИИ

ЗАХАРОВ МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ

Профессор Национального открытого института, Санкт-Петербург, канд. геолого-минерал. наук, почётный изыскатель РФ

Понимание ограничений, накладываемых природой на все виды человеческой деятельности, в том числе в строительной сфере, протекает с большими потерями на путях, усыпанных техногенными катастрофами. Человечество настойчиво ищет реперные точки метастабильных состояний. Между тем, геологическая действительность дает громадную пищу для размышлений, предоставляя объекты, построенные по правилам «золотого сечения, и процессы, действующие по этому же правилу.

В научно-практическом журнале «Фундаменты» (№3/2022 год) вышла статья И.З. Гольдфельда «Натурализация принципов Золотого сечения в геомеханике: от образцов грунта до планеты Земля» (с.с. 62-68). В этой статье автор приходит к ряду фундаментальных натурфилософских выводов, выходящих за рамки геомеханики как достаточно узкой прикладной дисциплины с весьма расплывчатым предметом исследований. Интересен сам исторический путь автора, выдающегося инженера советского периода, автора многочисленных патентов и изобретений (более 70) в области фундаментостроения и производства инженерных работ. И.З. Гольдфельд был активным участником разработки целого ряда нормативных документов и конкретных проектов, связанных с ликвидацией техногенных катастроф на суше и под водой. Он проработал всю жизнь в таких научно-производственных организациях как ПНИИИС Госстроя СССР, НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, институт Фундаментпроект Минмонтажстроя (см. И.З. Гольдфельд, 1971-2021). Это впечатляющий путь исследований процессов деформаций грунтового основания по фазам его нагружения вплоть до критической величины. Именно на этом пути автор пришел к своим нетривиальным выводам о том, что в геологической среде (от образца породы до планеты в целом) есть опорные точки метастабильного состояния систем, выделяемых нами в процессе познания.

Вообще в окружающей нас природе господствуют фрактальные отношения постоянно меняющихся состояний наподобие облачных образований небесной сферы. Эти причудливые фрактальные образования ограничиваются некоторыми планетарными константами, фиксирующими начальные и граничные условия процессов, которые их вызывают, а мы опираемся на них в решении различного рода практических задач. Вероятно, такие реперные точки метастабильности связаны с интегральным эффектом наложения друг на друга планетарных полей – гравитационного, электромагнитного, температурного, кинематического и других, о которых мы ещё только догадываемся.

Понимание ограничений, накладываемых природой на все виды человеческой деятельности, в том числе в строительной сфере, протекает с большими потерями на путях, усыпанных техногенными катастрофами. Челове-

чество настойчиво ищет реперные точки метастабильных состояний, и построения И.З. Гольдфельда лежат именно в этом русле. Пропорции гармонии, нащупанные на практике древнегреческими архитекторами и скульптурами, начиная с Фидия (500-430 г. до н.э.), привели к формулировке правила «золотого сечения», определяющего наиболее устойчивое соотношение целого и его частей, при котором отношения частей между собой и наибольшей части к целому равны. Это правило подтверждается числовым рядом Фибоначчи («Фибоначчи» Леонардо Пизанский, итальянский математик 1170-1250 г. г.), в котором каждое последующее число равно сумме двух предшествующих. В этом ряду действует магический коэффициент 1,618. Человеческое познание давно вращается вокруг этих констант, а в практической плоскости реализации строительных проектов старается их не замечать или обойти. Геологическая действительность дает громадную пищу для размышлений на эту тему, предоставляя объекты, построенные по правилам «золотого сечения, и процессы, действующие по этому же правилу.

Например ►

1. Замечено, что формирование террас в распластанных речных долинах на равнинах Северной Евразии в едином цикле подъема территории (соответственно понижения базиса эрозии) связано с организацией стока поверхностных вод в речном бассейне и процессами разрушения пород, слагающих территорию бассейна, переноса и аккумуляции рыхлых осадков, при этом формируется комплекс террас по высотным уровням, демонстрирующим ряд чисел Фибоначчи. Пойменный комплекс террас в пределах 1-3 м по высоте над местным базисом эрозии свидетельствует о нестационарном режиме процесса формирования долины (правило «золотого сечения» ещё не действует), а далее выстраивается комплекс террас с бровками на высотах 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89 метров и далее с тем же соотношением 1, 618 между соседними уровнями пока этап подъема территории бассейна не сменится опусканием или не будет прерван катастрофическими тектоническими подвижками соответствующего планетарного геотектонического цикла. Таким образом природа в морфологии речных долин демонстрирует и запечатлевает геологическую историю рассматриваемого региона, с которым связана речная долина, формирующаяся по пра-

вилу «золотого сечения» на определенных отрезках геологического времени. Стоит заметить, что речные террасы – это прекрасные строительные площадки, подготовленные самой природой, где оптимизированы все параметры окружающей среды. Это «золотой» фонд геологического пространства, который часто бездумно используется или вообще безвозвратно разрушается.

2. Опираясь на правило «золотого сечения», можно прогнозировать формирование и движение покрова рыхлых осадков в пределах единого морфодинамического элемента земной поверхности, например склона определенной крутизны. Здесь следует обратить внимание на соотношение площадей, занятых покровом рыхлых осадков и площадей, сложенных коренными породами, т.е. свободных от такого покрова. Если это соотношение близко к величине 1.62, можно говорить о метастабильном положении такого покрова на склоне. Превышение этой величины свидетельствует о наличии подвижек покрова вниз по склону, а уменьшение этого показателя указывает на потенциальный рост покрова рыхлых осадков в пределах рассматриваемого склона. Подобный прогноз очень важен при оценке инженерно-геологических условий для подводных месторождений.

3. Можно предположить, что формирование структуры кобальтомарганцевых корок на гайотах Тихого океана тоже демонстрирует правило «золотого сечения». Корки с подстилающим субстратом характеризуются как слоистые, анизотропные природные образования. Явление прочностной анизотропии слоев корок и подстилающих субстратов объясняется структурно-текстурными особенностями, неоднородностью химического и минерального состава. Помимо этого, прочность корок и субстрата зависит от степени их трещиноватости. Выполненные исследования по физико-механическим свойствам корок позволяют дифференцировать их по структуре, прочности различных корковых слоев и контактов между ними. Правило «золотого сечения» подсказывает, что распределение контактов внутри корковых образований должно происходить в интервале чисел Фибоначчи, т.е. первые три сантиметра корки должны демонстрировать нестационарный процесс активного роста корки, а далее контактные поверхности, демонстрирующие анизотропию корок, должны возникать на уровне 5, 8, 13 и 21 сантиметра от поверхности и далее с шагом 1.62 до тех

пор, пока не будет исчерпан геохимический потенциал процесса коркообразования, основанный на обмене между материнской породой и придонным слоем океанической воды. Пока это лишь предположение, которое требует дополнительных исследований в рамках проектов выбора способа отделения и дробления корок, но важность таких исследований очевидна.

Ряд таких примеров, вытекающих из практики геологоразведочных ра-

бот, можно продолжать до бесконечности, и каждый практикующий геолог наверняка имеет свой банк данных, подтверждающий или опровергающий высказанные соображения, но если такие опровержения существуют, то важно разобраться, каковы механизмы таких отклонений от правила «золотого сечения».

В этом отношении инженерам-геологам, работающим в тесном контакте со специалистами в области геотехники и

механики горных пород, важно материалы своих исследований и изысканий проверять и оформлять в рамках правил «золотого сечения», подтверждающих универсальность законов природы. Это должно помочь разрабатывать наиболее устойчивые конструкции, энергосберегающие механизмы, лабораторное оборудование, оптимизировать полевые и лабораторные исследования пород, выстраивать методику полевых и лабораторных наблюдений. **И**

Реклама в журнале



Независимый электронный журнал «ГеоИнфо» на сегодняшний день является ведущим отраслевым средством массовой информации в сфере инженерных изысканий, геотехнического проектирования и инженерной защиты территории. Ежемесячная аудитория журнала превышает 15 000 уникальных посетителей.

Благодаря тому, что все статьи размещаются в группах журнала в социальных сетях и затем транслируются в другие профильные группы, каждый опубликованный материал находит читателей именно внутри своей целевой аудитории.

Многие статьи в адаптированном варианте дублируются на нашем канале в Яндекс.Дзен, у которого уже более 3000 подписчиков и аудитория которого превышает 100 тысяч человек.

Прайс-лист на размещение рекламы в 2022 году (без НДС)

- Рекламная статья в журнале – 25 000 рублей.
- В каждую статью могут быть добавлены любые дополнительные материалы: каталоги оборудования, прайсы, фотографии, видеоролики, демоверсии программ и пр.
- Логотип в разделе «Спонсоры проекта» в правой колонке – 25 000 рублей в месяц.

Все наши спонсоры получают свою персональную страницу на сайте журнала, где размещается информация о компании-спонсоре, все статьи ее сотрудников, опубликованные в журнале «ГеоИнфо» или в Базе знаний, а также любые дополнительные материалы (каталоги, буклеты, видео).

Коллеги и друзья! Наше с Вами рекламное сотрудничество будет взаимовыгодным. Вы получите отличную площадку для лоббирования своих интересов, а мы – возможность и дальше развивать проект, бороться за интересы отрасли инженерных изысканий и помогать профессионалам.

Тел.: +7 (499) 340-340-9, (916) 240-03-22
E-mail: info@geoinfo.ru



Авторам электронного журнала «ГеоИнфо»

Журнал «ГеоИнфо» – это независимое электронное издание. Мы готовы предоставлять площадку для выступления любому автору, если материал кажется нам интересным и важным для профессионального сообщества.

Мы не рецензируем каждую статью, что позволяет нам размещать самые разные точки зрения, даже если они не вполне соответствуют общепринятым концепциям и теориям. Вместе с тем, мы оставляем за собой право привлечь при подготовке статей к публикации независимых экспертов. Их мнение может быть опубликовано вместе со статьей по усмотрению главного редактора.

Каждый желающий в комментариях к статье может поддержать автора или высказать аргументы в пользу противоположной точки зрения. Для этого необходимо зарегистрироваться.

Требования к оформлению:

Каждая статья, присланная для публикации в журнале «ГеоИнфо», должна сопровождаться аннотацией, заглавной горизонтальной картинкой высокого качества (не менее 300 dpi), портретной фотографией и краткой биографией автора с контактными данными.

Стиль изложения – литературный.

Автор по своему желанию может дополнить статью ее английской версией или переводом ревью для англоязычной версии сайта.

Темы для статей – широкий круг проблем, актуальных в повседневной жизни руководителей изыскательских компаний и инженеров. Наша основная специализация – опыт практиков для практиков.

Высылайте Ваши статьи на электронную почту info@geoinfo.ru.

Мы будем рады сотрудничеству!



Реклама в журнале

Независимый электронный журнал «ГеоИнфо» на сегодняшний день является ведущим отраслевым средством массовой информации в сфере инженерных изысканий, геотехнического проектирования и инженерной защиты территории. Ежемесячная аудитория журнала превышает 15 000 уникальных посетителей.

Благодаря тому, что все статьи размещаются в группах журнала в социальных сетях и затем транслируются в другие профильные группы, каждый опубликованный материал находит читателей именно внутри своей целевой аудитории.

Многие статьи в адаптированном варианте дублируются на нашем канале в Яндекс.Дзен, у которого уже более 3000 подписчиков и аудитория которого превышает 100 тысяч человек.

Прайс-лист на размещение рекламы в 2022 году (без НДС)

- Рекламная статья в журнале – 25 000 рублей.
- В каждую статью могут быть добавлены любые дополнительные материалы: каталоги оборудования, прайсы, фотографии, видеоролики, демоверсии программ и пр.
- Логотип в разделе «Спонсоры проекта» в правой колонке – 25 000 рублей в месяц.

Все наши спонсоры получают свою персональную страницу на сайте журнала, где размещается информация о компании-спонсоре, все статьи ее сотрудников, опубликованные в журнале «ГеоИнфо» или в Базе знаний, а также любые дополнительные материалы (каталоги, буклеты, видео).

Коллеги и друзья! Наше с Вами рекламное сотрудничество будет взаимовыгодным. Вы получите отличную площадку для лоббирования своих интересов, а мы – возможность и дальше развивать проект, бороться за интересы отрасли инженерных изысканий и помогать профессионалам.

Тел.: +7 (499) 340-340-9, (916) 240-03-22
E-mail: info@geoinfo.ru

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ НЕЗАВИСИМОГО
ЭЛЕКТРОННОГО ЖУРНАЛА «ГЕОИНФО»**

АНАНКО Виктор Николаевич
Главный редактор журнала «ГеоИнфо»

БЕРШОВ Алексей Викторович
Генеральный директор
ГК «Петромоделинг», ассистент кафедры Инженерной
и экологической геологии Геологического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова

ГИЗЗАТУЛЛИН Рушан Рафаэлевич
Инженер-геотехник
ООО «НИП-Информатика»

ЖИДКОВ Роман Юрьевич
Начальник группы разработки программного
обеспечения по геологии
ГБУ «Мосгоргеотрест», к.г.-м.н.

ИСАЕВ Владислав Сергеевич
Старший научный сотрудник кафедры геокриологии
геологического факультета МГУ, к.г.-м.н.

ЛАТЬПОВ Айрат Исламгалиевич
Руководитель Лаборатории по исследованию грунтов в строительстве,
доцент по специальности «Инженерная геология, мерзлотоведение и
грунтоведение», член национального реестра специалистов в области
строительства, эксперт Министерства экологии и природных ресурсов
Республики Татарстан, к.т.н.

МАШТАКОВ Александр Сергеевич
Главный специалист ООО Арктический научный центр (Роснефть),
руководитель Волгоградского отделения Общественной организации
Российское геологическое общество, эксперт Российского газового
общества, к.г.-м.н.

МИРНЫЙ Анатолий Юрьевич
Старший научный сотрудник Геологического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова, руководитель проекта
«Независимая геотехника», к.т.н.

ПИОРО Екатерина Владимировна
Генеральный директор
ООО «Петромоделинг Лаб», к.г.-м.н.

СУДАКОВА Мария Сергеевна
Старший преподаватель кафедры сейсмометрии и геоакустики
геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова, Научный
сотрудник института Криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, к.ф.-м.н.

СЛОБОДЯН Владимир Юрьевич
Генеральный директор
АО «Институт экологического проектирования и изысканий»
(АО «ИЭПИ»)

ФЕДОРЕНКО Евгений Владимирович
Научный консультант
ООО «НИП-Информатика», к.г.-м.н.