

ОГЛАВЛЕНИЕ

В. В. Наумова ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА-СОСТАВИТЕЛЯ	283–284
И. В. Бычков, Д. П. Гладкочуб, Г. М. Ружников, К. Ж. Семинский, В. В. Парамонов, С. В. Алексеев, С. А. Борняков, А. А. Добрынина, А. А. Рыбченко, А. М. Кононов, А. В. Поспеев, С. В. Рассказов, В. А. Саньков, И. К. Семинский ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ	285–302
А. П. Григорюк, Л. П. Брагинская, И. К. Семинский, К. Ж. Семинский, В. В. Ковалевский ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ	303–316
А. С. Ерёменко, Д. Е. Лещикова, Л. С. Романенкова ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОГО ПОРТАЛА «ИСТОРИЯ ЗЕМЛИ: ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РАКУРС»	317–335
В. С. Ерёменко, В. В. Наумова СОЗДАНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ ПО ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ГЕОЛОГИИ	336–347
В. В. Наумова, В.С. Ерёменко, А.С. Еременко ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИИ VI ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НАУК О ЗЕМЛЕ И ЦИФРОВИЗАЦИЯ В ГЕОЛОГИИ И ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ITES-2022»	348–359
А. А. Салахутдинова, Н. В. Шестаков, Е. А. Лялюшко, Н. А. Гагарский СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ЮЖНОЙ ОКОНЕЧНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО СИХОТЭ-АЛИНСКОГО РАЗЛОМА ПО ДАННЫМ ГНСС- НАБЛЮДЕНИЙ	360–375

А. Н. Четырбоцкий

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ГРАНИЦЕ АСТЕНОСФЕРА–ЛИТОСФЕРА

(МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ)

376–401

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА-СОСТАВИТЕЛЯ

Настоящий тематический выпуск журнала «Электронные библиотеки» сформирован по материалам VI Всероссийской конференции «Информационные технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности. ITES-2022», которая проходила во Владивостоке, в Дальневосточном федеральном университете 3–7 октября 2022 г.

Организаторы конференции: Отделение наук о Земле Российской академии наук (РАН), Академия горных наук, Государственный геологический музей (ГГМ) им. В.И. Вернадского РАН, Дальневосточный федеральный университет. Конференция проведена при финансовой поддержке Государственной программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» и в рамках государственного задания ГГМ РАН по теме № 1021061009468-8-1.5.1 «Цифровая платформа интеграции и анализа геологических и музейных данных».

Доклады, представленные на конференции, описывают результаты последних лет в следующих областях: открытый доступ к научным данным и алгоритмам обработки в области наук о Земле; особенности данных (в том числе Big Data) в науках о Земле: новые концепции и методы, инструменты их сбора, интеграции и обработки в различных информационных системах, в том числе в системах с интенсивным использованием данных; цифровые пространства геологических знаний; информационно-вычислительные геологические компьютерные системы; платформы обработки геологических данных; интеллектуальный анализ данных, извлечение фактов и знаний из научных публикаций; тезаурусы, онтологии, концептуальное моделирование, семантический Веб, связанные данные, сервисы, семантическое структурирование контента, применение в науках о Земле; управление развитием территорий освоения природных ресурсов на основе технологий и данных дистанционного зондирования Земли; технологии виртуальной и дополненной реальности для создания систем демонстрации и популяризации достижений в науках о Земле; цифровая трансформация в геологии и горнодобывающей промышленности и цифровые двойники и др. Участие в конференции приняли более чем 100 специалистов из институтов РАН и университетов РФ, из 15 городов РФ: Москвы, Санкт-Петербурга, Новосибирска, Томска, Иркутска, Красноярска, Магадана, Петропавловска-Камчатского, Южно-Сахалинска, Махачкалы,

Тюмени, Апатитов, Волгограда, Кемерово, Владивостока и др. Доклады на научных сессиях прошли в двух режимах: очном и удаленном. Участники конференции заслушали и обсудили более 60 докладов.

Пленарная сессия конференции содержала доклады известных российских ученых, работающих в самых современных направлениях, связанных с информационными технологиями для наук о Земле.

В настоящем тематическом выпуске представлены избранные доклады участников конференции, представленные для публикации Программным комитетом.

В.В. Наумова, д. г.-м. н., г. н. с., зав. Научным отделом Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН, зам. Председателя Программного комитета конференции

УДК 551+004.9

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

И. В. Бычков²[0000-0002-1765-0769], Д. П. Гладкочуб¹[0000-0001-7227-8253], **Г. М. Ружников**²,
К. Ж. Семинский¹[0000-0001-7607-0417], В. В. Парамонов²[0000-0002-4662-3612],
С. В. Алексеев¹[0000-0002-3853-5022], С. А. Борняков¹[0000-0002-5119-1092], А. А. Добрынина¹,
А. А. Рыбченко¹[0000-0003-2615-8423], А. М. Кононов¹[0000-0003-2379-4782],
А. В. Поспеев¹[0000-0001-5938-1942], С. В. Рассказов¹[0000-0001-9084-1652],
В. А. Саньков¹[0000-0002-1066-2601], И. К. Семинский¹[0000-0002-7530-0716]

¹Институт земной коры СО РАН 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

²Институт Динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова
СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134

Аннотация

Байкальская природная территория (БПТ) – территория, прилегающая к озеру Байкал, являющемуся уникальным природным объектом и, в соответствии с конвенцией ЮНЕСКО, «Объектом всемирного природного наследия». Байкал находится на центральной части Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) – самой активной сейсмической зоной, расположенной в середине России. Развитие БРЗ приводит к возникновению опасных геологических процессов, которые могут привести к нарушению экологического равновесия в системе озера Байкал и окружающей территории. Кроме того, эти процессы и явления представляют реальную угрозу для бесперебойного функционирования магистральных коммуникаций, ГЭС и стратегически важных производств в регионе, относящуюся по классификации МЧС России к первой категории опасности. Для обеспечения постоянного мониторинга и прогнозирования экологической обстановки БПТ организованы систематические наблюдения, а также получение и анализ информации об активности опасных геологических процессов в цифровом виде. Цифровая трансфор-

© И. В. Бычков, Д. П. Гладкочуб, Г. М. Ружников, К. Ж. Семинский, В. В. Парамонов, С. В. Алексеев, С. А. Борняков, А. А. Добрынина, А. А. Рыбченко, А. М. Кононов, А. В. Поспеев, С. В. Рассказов, В. А. Саньков, И. К. Семинский, 2022.

Данная статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

мация мониторинга опасных геологических процессов, вытекающая из цифровизации процессов и развития соответствующей инфраструктуры, обеспечивает возможность использования новых моделей и методов, более гибких подходов к анализу протекающих процессов и предсказанию возможных экстремальных явлений. В настоящей работе предлагается цифровая платформа, обеспечивающая поддержку цифровой трансформации мониторинга опасных геологических процессов на примере БПТ. Созданная и развиваемая платформа может быть также использована для экологического мониторинга БПТ в целом.

Ключевые слова: цифровая платформа, цифровая трансформация, сейсмичность, землетрясение, геофизика, опасные геологические процессы, мониторинг, прогноз, модели.

ВВЕДЕНИЕ

Байкальская природная территория (БПТ) – территория, в состав которой входят озеро Байкал, водоохранная зона, прилегающая к озеру Байкал, его водосборная площадь в пределах территории Российской Федерации, а также особо охраняемые природные территории, прилегающие к озеру, общей шириной до 200 километров на запад и северо-запад от него [1]. БПТ относится к районам с высокой сейсмической активностью [2]. Мониторинг сейсмической активности и связанных с ними опасных геологических процессов (ОГП) представляет огромный интерес как для фундаментальной науки, так и для задач обеспечения безопасности и прогнозирования перспективного социально-экономического развития региона.

Исследования ОГП базируются на передаче и обработке большого объема научных данных, полученных различными способами. Широкое использование цифровых технологий позволяет обеспечить не только повышение эффективности традиционных методов, но и разработку и внедрение инновационных. Переход к цифровым технологиям требует создания как инструментальной базы для сбора сведений в цифровом виде, так и создания инфраструктуры для передачи и обработки данных. В целом это позволяет повысить доступность и эффективность обработки больших объемов данных [3]. Внедрение цифровых технологий

обеспечивает преобразование различных бизнес-процессов, связанных со сбором и обработкой данных о геологических процессах, изменение устоявшихся моделей и форматов взаимодействия между участниками информационного обмена, что является признаком цифровой трансформации.

Основой цифровой трансформации мониторинга опасных геологических процессов БПТ служат платформенный подход, а также использование сервис-ориентированной парадигмы, базирующейся на стандартах Open Geospatial Consortium¹, инфраструктурного подхода, декларативных спецификаций, а также сквозных и веб-технологий сбора и обработки больших объёмов тематических пространственно-временных данных. Цифровая платформа, являясь открытой системой алгоритмизированного сетевого взаимодействия участников мониторинга БПТ, аккумулирует в себе новейшие методы, технологии и предоставляет доступ к большим объёмам пространственно-временных данных, сервисам их обработки, а также к цифровым инструментам и услугам.

На первом этапе проведения цифровой трансформации ОГП БПТ формируется программно-аппаратное обеспечение пилотной системы комплексного цифрового мониторинга опасных геологических процессов (землетрясений, оползней, селевых потоков, обвалов и др.), оказывающих существенное влияние на экологическое состояние Байкальской природной территории и озера Байкал. При этом измерительный комплекс системы включает современное оборудование, фиксирующее параметры деформаций горных пород, движений земной коры, сейсмичности, эманаций радона, электропроводности пород, режима подземных вод и экзогенных явлений.

СЕТЬ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Основу наблюдательной сети в пределах каждого полигона составляет пункт комплексного мониторинга ОГП. Инфраструктуру полигона дополняют станции систематических сезонных измерений и наблюдений за инженерно-геологическими и другими явлениями, на фоне которых активизируется ОГП. Измерения производятся с использованием современного отечественного и зарубежного

¹ <https://www.ogc.org>

оборудования. Приборы устанавливаются как на поверхности, так и в небольших подземных бункерах и скважинах для того, чтобы снизить влияние на измерения атмосферных факторов. Оборудование для сбора, преобразования и передачи данных располагается в павильонах на поверхности.

На сегодняшний день Институтом земной коры (ИЗК) СО РАН на БПТ реализовано три пункта комплексных геофизических измерений, отвечающих за мониторинг опасных геологических процессов на территории полигонов «Бугульдейка», «Приольхонье» и «Южный Байкал». Связь с пунктами позволяет в режиме on-line получать данные и размещать в доступе на сервере в Центре комплексного мониторинга опасных геологических процессов ИЗК СО РАН [4].

РАЗРАБОТКА СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПОИСК ПРЕДВЕСТНИКОВ ИХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Одним из наиболее опасных геологических процессов на территории БПТ является сейсмичность, которая проявляется в результате перемещений по разломам Байкальской рифтовой зоны. Ежегодно в Прибайкалье фиксируется несколько тысяч землетрясений в год, из которых 1–2 десятка ощущаются населением региона. Только за последний период инструментальных наблюдений произошло несколько сильных землетрясений (1950, 1957, 1959 гг.). Кроме разрушений, происходящих непосредственно от сейсмического толчка, землетрясения являются триггерами других ОГП – селей, обвалов, оползней, лавин. В связи с этим данные мониторинга ОГП на БПТ рассмотрены нами на примере отражения в них сейсмических активизаций.

На основе анализа сейсмического режима, проведенного в прошлые годы, установлены пространственно-временные закономерности проявления сейсмической активности, которые легли в основу прогнозных построений. Составлены карты долгосрочного прогноза, установлены средние периоды повторяемости землетрясений разной интенсивности. Вместе с тем, недавно эта периодичность была существенно нарушена. В течение полугода (сентябрь 2020 г. – январь 2021 г.) в БРЗ произошло три достаточно сильных землетрясения (Быстринское, Кударинское, Хубсугульское), которые ощущались в крупных городах Прибайкалья с интенсивностью 5 баллов (Рисунок 1).

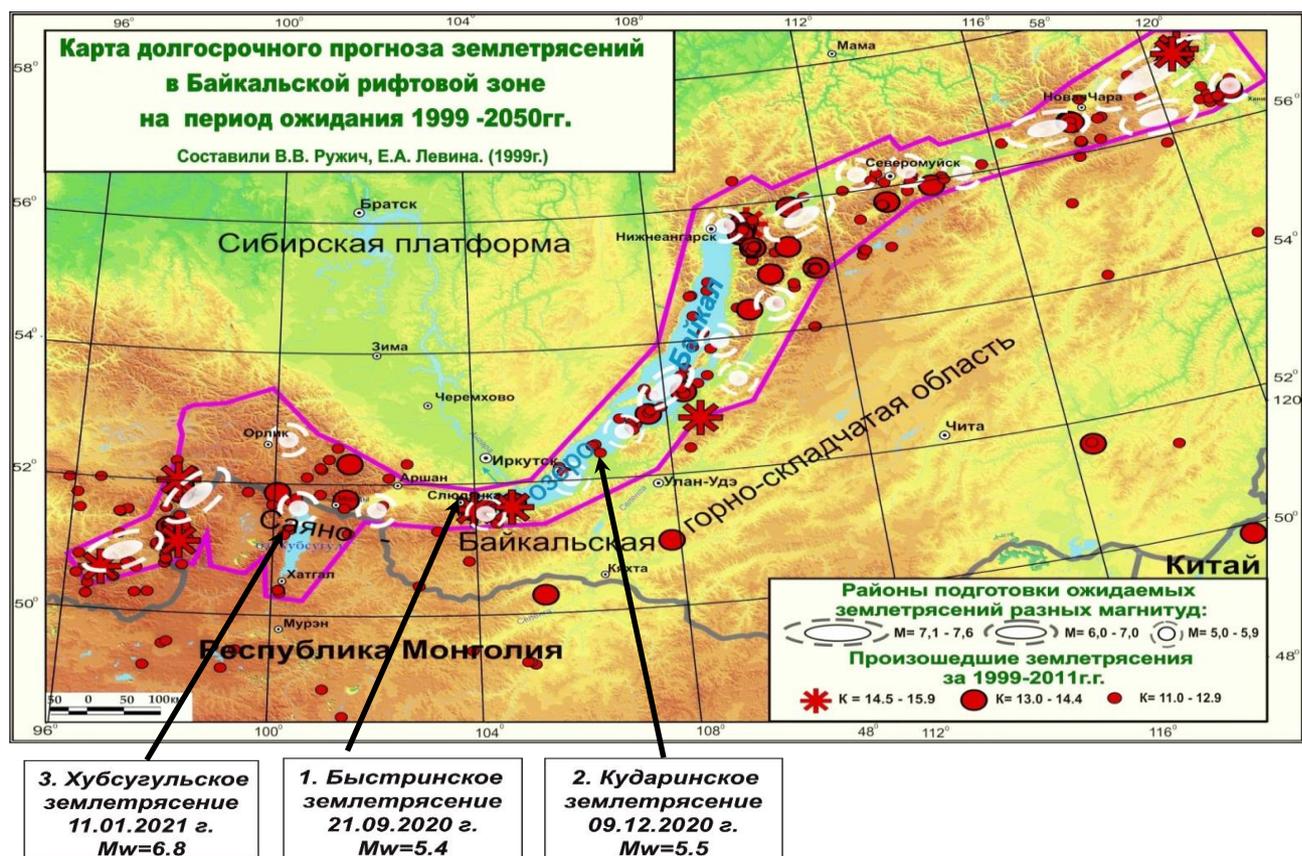


Рисунок 1. Эпицентры землетрясений интенсивностью 5 баллов, сентябрь 2020 г. – январь 2021 г.

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ БПТ

Ввиду того, что сейсмическая активизация, предшествующая землетрясению или рою землетрясений, – масштабный и относительно скоротечный процесс, отражаться она может во многих физических полях планеты. Предвестниками землетрясений и явлениями, сопутствующими сейсмической активизации, могут быть изменения:

- напряженно-деформированного состояния горных пород;
- характера микросейсмического шума;
- электропроводности сейсмогенерирующего слоя и аномальное поведение вертикальной компоненты электротеллурического поля;
- объемной активности почвенного радона;
- химического состава поверхностных вод;
- уровня воды в скважинах;
- и проч.

На сегодняшний день геофизики имеют многолетний массив измерений, что позволяет выявить наиболее вероятные сценарии отражения сейсмической активизации в физических полях, измеренных в различных областях БПТ. Для обеспечения своевременного комплексного анализа данных предлагается использовать электронную цифровую платформу, служащую интерфейсом для удобного доступа к базе данных геофизических измерений.

ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Научные исследования как об опасных геологических процессах, так и в целом о состоянии экологии озера Байкал и Байкальской природной территории, основаны на больших цифровых базах данных (БД) мониторинга, знаниях, моделях и реализующем их программном обеспечении, локализованных в институтах СО РАН, вузах, территориальных органах власти и управления [5, 6]. Можно отметить, что на текущий момент обработка и анализ данных мониторинга проводятся эпизодически силами исследователей. Использование ручной работы исследователей является слабым звеном для реализации жизненного цикла обработки данных. Поэтому переход к регулярной обработке и анализу данных обосновывает минимизацию или полное исключение ручной работы исследователей. Следовательно, методы обработки и анализа данных должны быть полностью автоматизированы и оформлены в виде сервисов. Временной интервал между итерациями обработки данных зависит от решаемой задачи. Это обеспечит возможность проведения открытого информационного обмена данными экологического мониторинга БПТ среди заинтересованных субъектов. Это, в свою очередь, позволит повысить эффективность проведения комплексных междисциплинарных научных исследований и внедрение их результатов в управлении территориальным развитием. Таким образом, актуальна задача проведения цифровой трансформации в систему экологического мониторинга БПТ и, в частности, мониторинга опасных геологических процессов, т. е. необходимо использовать современные цифровые технологии и сервисы обработки, хранения больших объёмов пространственно-временных данных и знаний, сервис-ориентированной парадигмы, стандартов OGC, веб-сервисов, а также внедрять современные распределённые информационно-телекоммуникационных технологии.

Цифровая платформа экологического мониторинга¹, разрабатываемая Институтом динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, является не только средой для накопления, обмена и управления данными в структурированном виде, но и обеспечивает поддержку взаимодействия участников цифровой экосистемы (участников мониторинга) через технологические интерфейсы платформы [7]. При этом цифровая платформа обеспечивает возможность сбора, хранения, обработки, анализа как цифровых данных мониторинга опасных геологических процессов, так и больших массивов разнородных пространственно-временных данных. Цифровая платформа реализует и поддерживает комплекс математических и информационных моделей, сервисов и методов машинного обучения и состоит из трех базовых компонент: инструментальной, инфраструктурной и прикладной.

Инструментальная целевая компонента платформы обеспечивает доступ участников целевой экосистемы мониторинга к разработке и отладке прикладных информационных и программно-аппаратных средств, предоставляя им инструментальные сервисы для обработки пространственно-временных данных и их интерфейсов. Для сбора данных в виде файлов развернута система Next Cloud, которая предоставляет систему хранения файлов и обмена данными. При этом каждый пользователь имеет список контактов, возможность предоставить свои данные всем или конкретным пользователям. Для обработки данных применяется Jupyter Notebook как наиболее мощный инструмент для анализа в интерактивном виде. Он объединяет программный код, математические уравнения и визуализацию в виде одного документа. Для организации многопользовательской работы используется JupyterHub, который позволяет настраивать рабочее пространство: директории пользователей, выбрать Docker образ, задать характеристики вычислительных узлов и другие параметры.

С точки зрения пользователя работа с цифровой платформой на уровне инструментальной компоненты проводится с помощью трех систем:

- 1) Геопортал (сбор и публикация реляционных данных) [8];
- 2) Next Cloud (сбор и публикация данных в виде файлов);
- 3) JupyterHub (анализ данных).

¹ <https://baikal-project.icc.ru>

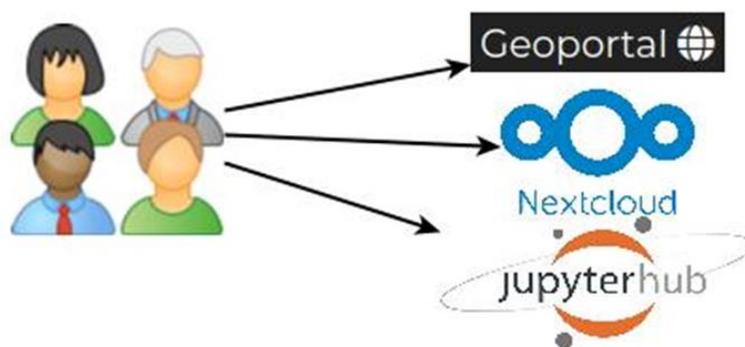


Рисунок 2. Подсистемы, с которыми взаимодействуют пользователи.

Интеграция JupyterHub, NextCloud и геопортала происходит на уровне системы хранения данных (СХД) и общей схемы авторизации. Регистрация пользователей производится в системе NextCloud, в которой предоставляется директория в СХД, где пользователь может хранить собственные данные в виде файлов. Эта директория также предоставляется пользователю в Геопортале и Jupyter Notebook.

Инфраструктурная цифровая платформа обеспечивает создание прикладных программно-аппаратных средств мониторинга, тематических WPS-сервисов обработки и распределённого хранения данных на основе высокопроизводительной информационно-аналитической среды, сервис-ориентированных и сквозных технологий. Проведение цифровой трансформации неразрывно связано с разработкой специализированной инфраструктуры, направленной на интеграцию данных мониторинга, получаемых различными исследовательскими группами, а также применение различных сервисов, в том числе распределенных, для их обработки. Для решения таких задач была создана вычислительная инфраструктура, обеспечивающая всем заинтересованным исследователям возможность хранения больших объёмов разноформатных пространственно-временных данных, высокоскоростной доступ к ним и возможность выполнения высоконагруженных вычислений. Инфраструктура состоит из связанных высокоскоростной сетью передачи данных на основе 10G-Ethernet системы хранения данных на базе Infortrend EonStor GS 1000 Gen2 (736 ТБ емкости), высокопроизводительной системы хранения данных на базе HPE MSA 2060 (27 ТБ емкости), высокоскоростной сети хранения данных (SAN), функционирующей на базе протокола Fibre Channel

12G, вычислительного кластера из 15 серверов с GPU NVidia RTX- 3080, 3090 (для машинного обучения). На базе основных инфраструктурных компонент с использованием системы виртуализации VMWare vSphere 7 сформирована облачная платформа (рРисунок 3), консолидирующая сетевые и вычислительные ресурсы с ресурсами систем (сети) хранения данных и гибко предоставляющая их для всех систем и сервисов проекта. Схема сетевой инфраструктуры цифровой платформы приведена на Рисунок 4.

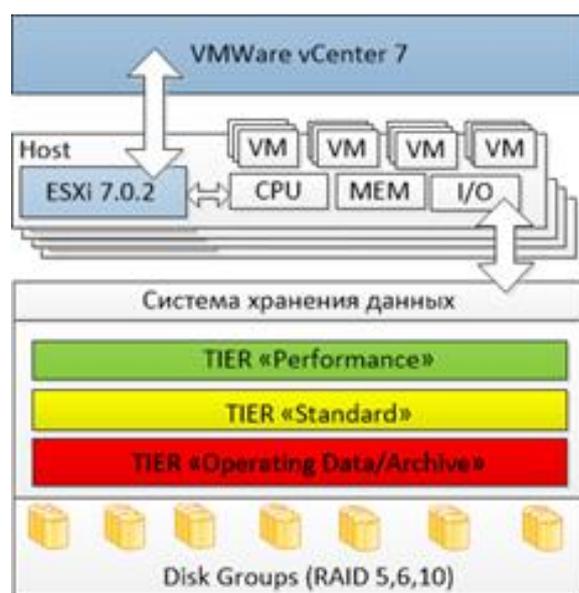


Рисунок 3. Облачная информационно-вычислительная платформа.

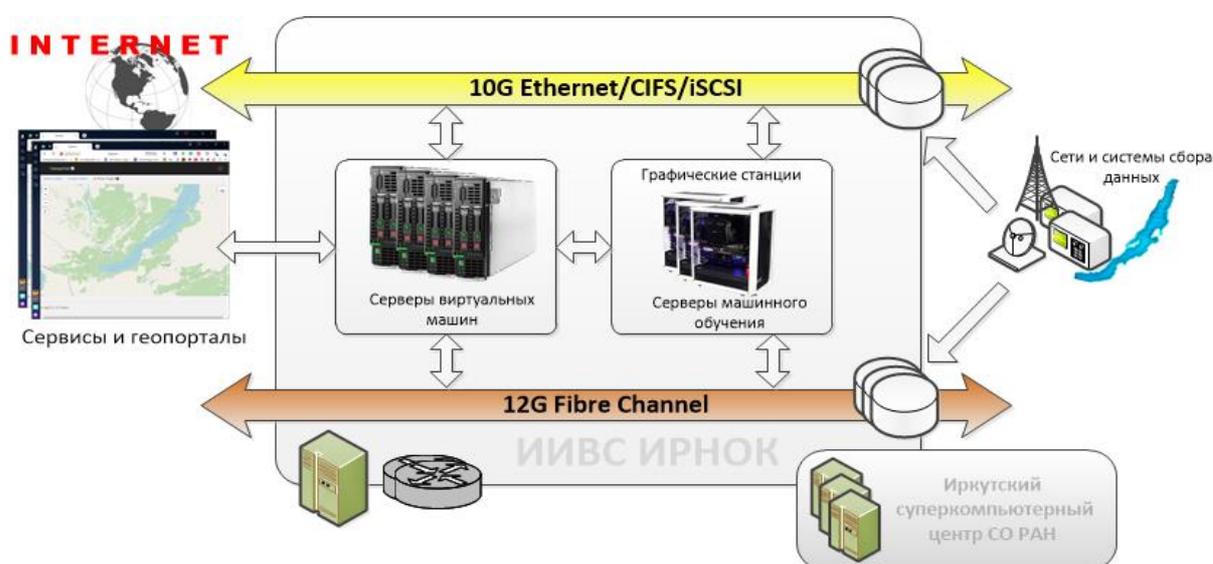


Рисунок 4. Сетевая инфраструктура цифровой платформы.

Прикладная цифровая платформа оперирует обработанными данными на уровне отдельной группы или вида мониторинга в целом, а также поддерживает алгоритмический обмен услугами (сервисами) между участниками цифровой экосистемы с использованием информационно-аналитической среды и технологической инфраструктуры. При реализации цифрового мониторинга необходима организация жизненного цикла обработки данных (рРисунок 5), которая обеспечивает регулярное выполнение всех ее этапов.



Рисунок 5. Жизненный цикл обработки данных

Существует множество методов, используемых для решения задач оценки и прогнозирования опасных геологических процессов и экологического равновесия на БПТ. Часть из методов создана в виде сервисов. Реализуемая цифровая платформа обеспечивает возможность сравнения имеющихся сервисов, а также добавления новых.

На сегодня разработаны и проходят апробацию основные компоненты цифровой платформы, обеспечивающие сбор, хранение и предоставление пространственно-временных данных, в том числе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), данных, получаемых с беспилотных летательных аппаратов, данных мониторинговых станций. Создана инфраструктура для разработки сервисов обработки мониторинговых данных, требующих высокопроизводительных вычислений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований предложена цифровая платформа, обеспечивающая цифровую трансформацию мониторинга опасных геологических процессов на примере БПТ. Данная платформа обеспечивает сбор, накопление и анализ данных об опасных геологических процессах и обеспечивает экологический мониторинг БПТ. В целом цифровая платформа аккумулирует в себе новейшие методы и технологии и предоставляет доступ к большим объемам пространственно-временных данных, сервисам их обработки, а также к цифровым инструментам и услугам. В рамках мониторинга опасных геологических процессов цифровая платформа позволяет аккумулировать в цифровом виде данные станций систематических сезонных измерений и наблюдений за инженерно-геологическими и другими явлениями, на фоне которых активизируется ОГП. Собранные данные используются для составления сценариев будущего развития опасных геологических процессов на территории БПТ, а также выявления предвестников их экстремальных проявлений. При этом программные сервисы, реализующие данные модели, могут являться как частью платформы, так и вызываться удаленно. Так обеспечивается возможность сопоставления имеющихся и применения новых моделей и методов, обеспечивающих более гибкие подходы к анализу протекающих процессов и предсказанию возможных экстремальных явлений. Потенциал наполнения данными и сервисами, в том числе и из смежных областей, делают платформу востребованной для решения задач экологического мониторинга. В свою очередь это представляет интерес не только для решения фундаментальных научных задач, но и задач социально-экономического развития БПТ.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2020-787 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Регулирование в области охраны озера Байкал // Росприроднадзор. URL: <https://03.rpn.gov.ru/activity/baikal/> (дата обращения 16.11.2022)
2. Лапердин В.К., Имаев В.С. Опасные геологические процессы в зоне Байкальского рифта и сопредельных территорий // Вопросы инженерной сейсмологии. 2010. Т. 37. № 1. С. 40–55.
3. Baholdina E., Karetnikov N., Tashnik I., Florya D., Savinov Yu. Цифровая трансформация промышленности с помощью Интернет-технологий (Digital Transformation of Industries With Internet Technologies) // Russian Foreign Economic Journal. 2018. No. 9, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4020423>
4. Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Перевалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А. Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. №5. 0677. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0677>
5. Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Khmelnov A.E., Popova A.K. Digital environmental monitoring technology Baikal natural territory // CEUR Workshop Proceedings: 3rd Scientific-Practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems (ITAMS 2020; Irkutsk, 3 September 2020). 2020. Vol. 2677.
6. Авраменко Ю.В., Ружников Г.М., Фёдоров Р.К., Хмельнов А.Е. Архитектура системы хранения и обработки пространственно-временных данных для выполнения задач цифрового мониторинга // Материалы конф. «Ляпуновские чтения» (Иркутск, 7–11 декабря 2020 г.). 2020. С. 1–2.
7. Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Hmelnov A.E. Organization of digital environmental monitoring: problems, solutions // Материалы Междунар. конф. "Environmental transformation and sustainable development in the Asian region" (Irkutsk, 8–10 September 2020). 2020. P. 148.
8. Avramenko Y.V., Popova A.K., Fedorov R.K. Cloud service of Geoportal ISDCT SB RAS for machine learning // CEUR Workshop Proceedings: 4th Scientific-Practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems (ITAMS 2021, Irkutsk, 14 September 2021). 2021. Vol. 2984. P. 6–10.

DIGITAL TRANSFORMATION OF HAZARDOUS GEOLOGICAL PROCESSES MONITORING ON THE EXAMPLE OF THE BAIKAL NATURAL TERRITORY

I. V. Bychkov²[0000-0002-1765-0769], D. P. Gladkochub¹[0000-0001-7227-8253], G. M. Ruzhnikov²,
K. Zh. Seminsky¹[0001-7607-0417], V. V. Paramonov²[0000-0002-4662-3612],
S. V. Alekseev¹[0000-0002-3853-5022], S. A. Bornyakov¹[0000-0002-5119-1092], A. A. Dobrynina¹,
A. A. Rybchenko¹[0000-0003-2615-8423], A. M. Kononov¹[0000-0003-2379-4782],
A. V. Pospuev¹[0000-0001-5938-1942], S. V. Rasskazov¹[0000-0001-9084-1652],
V. A. Sankov¹[0000-0002-1066-2601], I. K. Seminsky¹[0000-0002-7530-0716]

¹*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 128 Lermontova str, Irkutsk, 664033*

²*Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences 134 Lermontova str, Irkutsk, 664033*

Abstract

Baikal Natural Territory (BNT) is the territory that adjacent to Lake Baikal, which is a unique natural object and, in accordance with the UNESCO Convention, a "World Natural Heritage". Baikal is in the central part of the Baikal Rift Zone (BRZ) – the most active seismic zone located in the middle of Russia. The development of the BRZ leads to the emergence of dangerous geological processes that can lead to a violation of the balance in the Lake Baikal ecological system and the surrounding area. In addition, these processes and phenomena pose a real threat to the smooth functioning of main-line communications, hydroelectric power plants and strategically important industries in the region, which, according to the classification of the Ministry of Emergency Situations of Russia, belongs to the first category of danger. To ensure systematic monitoring and forecasting of the environmental situation of the BNT, systematic observations are organized, as well as obtaining and analysing information about the activity of hazardous geological processes in digital form. The digital transformation of monitoring of hazardous geological processes, resulting from the digitalization of processes and the development of appropriate infrastructure, provides the possibility of using new models and methods, more flexible approaches to the analysis of ongoing processes and the prediction of possible extreme events. In this paper, a digital platform is proposed that provides support for the digital transformation of the monitoring of hazardous

geological processes using the example of BNT. The platform under consideration may be used for ecological monitoring of BNT area.

Keywords: *digital platform, digital transformation, seismicity, earthquake, geophysics, dangerous geological processes, monitoring, forecast, models.*

REFERENCES

1. Regulirovanie v oblasti ohrany ozera Bajkal // Rosprirodnadzor. URL: <https://03.rpn.gov.ru/activity/bajkal/> (data obrashcheniya 16.11.2022)
2. *Laperdin V.K., Imaev V.S.* Opasnye geologicheskie processy v zone Bajkal'skogo rifta i sopredel'nyh territorij // *Voprosy inzhenernoj seismologii*. 2010. T. 37. № 1. S. 40–55.
3. *Baholdina E., Karetnikov N., Tashnik I., Florya D., Savinov Yu.* Digital Transformation of Industries with Internet Technologies // *Russian Foreign Economic Journal*. 2018. No. 9, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4020423>
4. *Seminskij K.ZH., Dobrynina A.A., Bornyakov S.A., San'kov V.A., Pospuev A.V., Rasskazov S.V., Perevalova N.P., Seminskij I.K., Luhnev A.V., Bobrov A.A., Chebykin E.P., Edemskij I.K., Il'yasova A.M., Salko D.V., San'kov A.V., Korol' S.A.* Kompleksnyj monitoring opasnyh geologicheskikh processov v Pribajkal'e: organizaciya pilotnoj seti i pervye rezul'taty // *Geodinamika i tektonofizika*. 2022. T. 13. №5. 0677. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0677>
5. *Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Khmel'nov A.E., Popova A.K.* Digital environmental monitoring technology Baikal natural territory // *CEUR Workshop Proceedings: 3rd Scientific-Practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems (ITAMS 2020; Irkutsk, 3 September 2020)*. 2020. Vol. 2677.
6. *Avramenko Yu.V., Ruzhnikov G.M., Fyodorov R.K., Hmel'nov A.E.* Arhitektura sistemy hraneniya i obrabotki prostranstvenno-vremennyh dannyh dlya vypolneniya zadach cifrovogo monitoringa // *Materialy konf. «Lyapunovskie chteniya» (Irkutsk, 7–11 dekabrya 2020 g.)*. 2020. S. 1–2.
7. *Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Hmel'nov A.E.* Organization of digital environmental monitoring: problems, solutions // *Materialy Mezhdunar. konf. "Environmental transformation and sustainable development in the Asian region" (Irkutsk, 8–10 September 2020)*. 2020. P. 148.

8. Avramenko Y.V., Popova A.K., Fedorov R.K. Cloud service of Geoportal ISDCT SB RAS for machine learning // CEUR Workshop Proceedings: 4th Scientific-Practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems (ITAMS 2021, Irkutsk, 14 September 2021). 2021. Vol. 2984. P. 6–10.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



БЫЧКОВ Игорь Вячеславович, академик Российской академии наук, профессор, доктор технических наук, директор Института динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, заместитель председателя СО РАН по научной работе – директор Иркутского филиала Сибирского отделения РАН, г Иркутск.

Igor BYCHKOV, Academician of Russian Academy of Sciences, professor, Ph.D., director of the Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Deputy chairman of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences for scientific work – Director of the Irkutsk branch of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: bychkov@icc.ru

ORCID ID: 0000-0002-1765-0769



ГЛАДКОЧУБ Дмитрий Петрович, член-корреспондент РАН, профессор РАН, доктор геолого-минералогических наук директор Института земной коры СО РАН, г. Иркутск.

Dmitriy GLADKOCHUB, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Director of the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: dima@crust.irk.ru

ORCID: 0000-0001-7227-8253



РУЖНИКОВ Геннадий Михайлович, доктор технических наук, заведующий отделения Информационных технологий и систем Института динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, г. Иркутск

Gennady RUZHNIKOV, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Information Technologies and Systems of Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk



СЕМИНСКИЙ Константин Жанович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией тектонофизики Института земной коры СО РАН, г. Иркутск.

Konstantin SEMINSKIY, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Laboratory of Tectonophysics, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: seminsky@crust.irk.ru

ORCID ID: 0000-0001-7607-0417



ПАРАМОНОВ Вячеслав Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории Комплексных информационных систем Института динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, г. Иркутск

Viacheslav PARAMONOV, PhD., Senior Researcher of the Laboratory of Integrated Information Systems, of Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk

e-mail: slv@icc.ru

ORCID ID: 0000-0002-4662-3612



АЛЕКСЕЕВ Сергей Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии Института земной коры СО РАН, г. Иркутск.

Sergey ALEKSEEV, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Laboratory of Hydrogeology, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: alexeevgeo@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-3853-5022



БОРНЯКОВ Сергей Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН, г. Иркутск.

Sergey BORNYAKOV, PhD., Leading Researcher of the Laboratory of Tectonophysics, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: bornyak@crust.irk.ru

ORCID ID: 0000-0002-5119-1092



ДОБРЫНИНА Анна Александровна, кандидат физико-математических наук, ученый секретарь Института земной коры СО РАН, г. Иркутск.

Anna DOBRYNINA, PhD, Scientific Secretary, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: dobrynina@crust.irk.ru



РЫБЧЕНКО Артем Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, заведующий Лабораторией инженерной геологии и геоэкологии Института земной коры СО РАН, г. Иркутск.

Artem RYBCHENKO, PhD, Senior Researcher, Head of the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: rybchenk@crust.irk.ru

ORCID ID: 0000-0003-2615-8423



КОНОНОВ Александр Матвеевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии Института земной коры СО РАН, г. Иркутск.

Aleksandr KONONOV, Ph.D., Senior researcher of the Laboratory of Hydrogeology, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: kononov@crust.irk.ru

ORCID ID: 0000-0003-2379-4782



ПОСПЕЕВ Александр Валентинович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Aleksandr POSPEEV, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Oil and Gas Geology, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: avp@crust.irk.ru

ORCID ID: 0000-0001-5938-1942



РАССКАЗОВ Сергей Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, заведующий Лабораторией изотопии и геохронологии Института земной коры СО РАН, г. Иркутск.

Sergey RASSKAZOV, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Laboratory of Isotopies and Geochronology, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: rassk@crust.irk.ru

ORCID ID: 0000-0001-9084-1652



САНЬКОВ Владимир Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе Института земной коры СО РАН, г. Иркутск.

Vladimir SANKOV, PhD, Deputy Director for Scientific Work, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: sankov@crust.irk.ru

ORCID ID: 0000-0002-1066-2601



СЕМИНСКИЙ Игорь Константинович, кандидат геолого-минералогических наук, начальник центра комплексного мониторинга опасных геологических процессов Института земной коры СО РАН, г. Иркутск.

Igor SEMINSKIY, PhD, Head of the Center for Comprehensive Monitoring of Hazardous Geological Processes, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: iks@crust.irk.ru

ORCID ID: 0000-0002-7530-0716

Материал поступил в редакцию 30 августа 2022 года

S

УДК 004.5, 004.415

ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

А. П. Григорюк^{1[0000-0003-0388-2259]}, **Л. П. Брагинская**^{1[0000-0002-3469-3373]},
И. К. Семинский^{2[0000-0002-7530-0716]}, **К. Ж. Семинский**^{2[0000-0001-7607-0417]},
В. В. Ковалевский^{1[0000-0001-7143-3354]}

¹*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО
РАН*

²*Институт земной коры СО РАН*

¹and@opg.sccc.ru, ²iks@crust.irk.ru

Аннотация

Представлена цифровая платформа для данных комплексного мониторинга опасных геодинамических, инженерно-геологических и гидрогеологических процессов, протекающих в регионе интенсивного природопользования центральной экологической зоны Байкальской природной территории (ЦЭЗ БПТ). Платформа предназначена для интеграции и анализа данных, поступающих с нескольких полигонов, расположенных в пределах ЦЭЗ БПТ, с целью оценки состояния геологической среды и прогнозирования проявлений опасных процессов. Платформа построена по клиент-серверной архитектуре. Хранение, обработка и анализ данных осуществляются на сервере, к которому пользователи могут обращаться через интернет посредством веб-браузера. Блочная структура сервера позволяет легко расширять набор процедур обработки и анализа данных, а также визуализации результатов. В настоящее время доступны несколько методов фильтрации данных (линейная частотная, Савицкого–Голея и другие), различные методы спектрального и вэйвлет-анализа, мультифрактальный и энтропийный анализ, анализ пространственных данных. Цифровая платформа была опробована на реальных данных.

Ключевые слова: *геофизический мониторинг, цифровая платформа, предвестники, сейсмический прогноз, землетрясения.*

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения регулярно приносят бедствия во многих частях мира [1]. Байкальская природная территория (БПТ) является сейсмически активным районом страны в связи с развитием крупной межблоковой границы — Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). В год на территории БРЗ регистрируется до нескольких тысяч землетрясений, в основном слабых. Ощутимые события с магнитудой 5,0 и более происходят в Прибайкалье со средней периодичностью в 5 лет. За последние 300 лет здесь зарегистрировано более 15 крупных сейсмособытий, интенсивность которых была выше семи баллов. В 2020–2022 годах наблюдается смещение сейсмоактивности в южную часть БРЗ [2].

Возможные негативные последствия от землетрясений связаны с плотной заселённостью больших городов, расположенных на территории БРЗ, и наличием сложной промышленной инфраструктуры. Кроме того, землетрясения могут провоцировать оползни, обвалы и сели в районах активного природопользования.

Стремясь свести к минимуму ущерб, ученые десятилетиями пытались разработать методы прогнозирования землетрясений [3]. Однако прогнозирование землетрясений остается сложной задачей, т. к. процесс их подготовки еще недостаточно глубоко изучен. Прогнозные исследования обычно сосредоточены на эмпирическом анализе с использованием двух основных подходов [4]. Первый подход основан на выявлении отчетливых предвестников землетрясений. При втором подходе идентифицируются геофизические тренды или закономерности сейсмического процесса, предшествующие сильному землетрясению. Методы предвестников в основном используются для краткосрочного предсказания землетрясений; трендовые методы более полезны для прогнозирования промежуточных (1–10 лет) и долгосрочных (10–100 лет) событий [5].

В настоящей работе рассматривается цифровая платформа (ЦП), которая позволяет на базе цифровой обработки данных комплексного мониторинга реализовывать оба подхода.

СТРАТЕГИЯ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БПТ

Начиная с 1970-х годов, разрабатывалась концепция подхода к решению проблемы прогноза землетрясений и организации многодисциплинарного мониторинга БПТ [6–10]. К концу прошлого века Южно-Байкальский геодинамический полигон включал электромагнитный полигон (пос. Энхалук), вибрационный полигон (п. Бабушкин, Бурятия), комплексную обсерваторию «Талая», сеть тектономагнитных наблюдений в дельте р. Селенга, непосредственные измерения деформаций на Приморском разломе в Листвянке, а также сеть сейсмологических станций.

Исследования были направлены на анализ современных движений земной коры в пределах Байкальской рифтовой зоны и выработку стратегии прогноза сейсмической активности. За эти годы были получены фундаментальные знания о глубинном строении БРЗ, закономерностях развития сейсмических процессов, связи механизмов землетрясений с региональной сейсмичностью. В 1992–1993 гг. группой специалистов из различных институтов СО РАН был установлен факт смены преобладающих растягивающих напряжений в БРЗ на сжимающие. В этот промежуток времени (полтора года) сменился преобладающий тип землетрясений и уменьшилась сейсмическая активность. Размеры области, в которой произошла смена знака деформации, проявилась в наличии крупной тектономагнитной аномалии. Опыт данного открытия выявил одну из причин, по которой комплексы предвестников могут изменяться в течение времени в пределах одной очаговой зоны, а также показал важность комплексирования различных видов информации, включая численное моделирование напряженного состояния. Процесс подготовки землетрясений, проявляющийся в вариациях геофизических полей разной природы, охватывает более крупные объемы, чем зоны разрушений. Одним из факторов предразрушения является трещинообразование, которое проявляется в большинстве физических полей: сейсмических, электрических, гравитационных, влияет на гидрологические и геохимические показатели. Исходя из новых знаний о региональной сейсмичности БПТ, на смену принятой ранее концепции прогноза, основанной на поиске универсальных предвестников, в последние десятилетия упор делается на поиск комплекса предвестников для каждой из очаговых зон.

СЕТЬ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БПТ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Одной из важнейших задач мониторинга и сейсмического прогнозирования БПТ последних лет являются организация систематических наблюдений, а также получение и численный анализ данных комплексного геофизического мониторинга.

Институтом земной коры СО РАН создана пилотная сеть комплексного геофизического мониторинга, состоящая из трех полигонов: «Приольхонье», «Бугульдейка» и «Листвянка». Основу наблюдательной сети в пределах каждого полигона составляет пункт комплексного мониторинга. Инфраструктуру полигона дополняют станции систематических сезонных измерений и наблюдений за инженерно-геологическими и другими явлениями. Измерения производятся с использованием современного оборудования. Это радиометры, температурные логгеры, магнитотеллурические станции, регистраторы режима подземных вод, сейсмометры, GPS-приемники, деформометры и др. Приборы устанавливаются на поверхности, а также в небольших подземных бункерах и скважинах, чтобы снизить влияние атмосферных факторов на временные ряды наблюдаемых параметров. Оборудование для сбора, преобразования и передачи данных располагается в павильонах на поверхности [11].

Создание пилотной сети комплексного мониторинга совпало с периодом сейсмической активизации, в котором установленная ранее периодичность землетрясений была существенно нарушена. В течение полугода (сентябрь 2020 г. – январь 2021 г.) в БРЗ произошло три достаточно сильных землетрясения (Быстринское, Кударинское, Хубсугульское), которые ощущались в крупных городах Прибайкалья с интенсивностью 5 баллов.

На основе анализа сейсмического режима, проведенного в прошлые годы, установлены пространственно-временные закономерности проявления сейсмической активности, которые легли в основу прогнозных построений. Составлены карты долгосрочного прогноза, установлены средние периоды повторяемости землетрясений.

На основе анализа данных комплексного мониторинга, который был проведен специалистами ИЗК СО РАН, был предложен следующий сценарий активизации развития Байкальской рифтовой зоны в период 2020–2021 гг. Процесс был «запущен» Быстринским землетрясением, в результате которого южная часть Сибирского блока сместилась в СЗ направлении. Это привело к накоплению избыточных напряжений в его тыловой части и, как следствие, их разрядке в режиме растяжения посредством Кударинского землетрясения. «Высвобождение» СЗ части Забайкальского блока привело к его смещению на восток и инициированию Хубсугульского землетрясения с субширотной ориентацией оси растяжения. Близость во времени достаточно сильных для БРЗ сейсмических событий обусловлена тем, что они произошли в зонах крупных рифтообразующих разломов, определяющих кинематику главных блоков при формировании единой межплитной границы.

Существенную роль в повышении эффективности геофизических исследований играет разработанная специалистами ИВМиМГ СО РАН цифровая платформа, которая позволяет проводить обработку, вычислительный анализ и синхронную визуализацию данных различных видов мониторинга на одной временной сетке.

АРХИТЕКТУРА ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ

Цифровая платформа (ЦП) предназначена для интеграции и анализа данных, поступающих с нескольких полигонов, расположенных в пределах ЦЭЗ БПТ, с целью выявления аномалий и трендов во временных рядах, которые могут интерпретироваться как предвестники землетрясений.

ЦП построена по клиент-серверной архитектуре, её структурная схема приведена на рисунке 1. Предполагается, что Коллектор данных должен периодически подгружать данные с пунктов мониторинга, куда они поступают в реальном времени непосредственно с датчиков. Далее данные приводятся к единому формату и помещаются в Локальное хранилище. Веб-приложение обеспечивает взаимодействие с пользователями Рабочих станций. Пользователи через интерфейс ЦП в веб-браузере (рисунок 2) формируют запросы к серверу, выбирая интересующий их интервал времени, пункты мониторинга, виды мониторинга и каналы,

виды обработки и анализа данных. В соответствии с запросом серверный сценарий извлекает нужные данные из Локального хранилища, производит их анализ и визуализацию и отправляет результат пользователю.

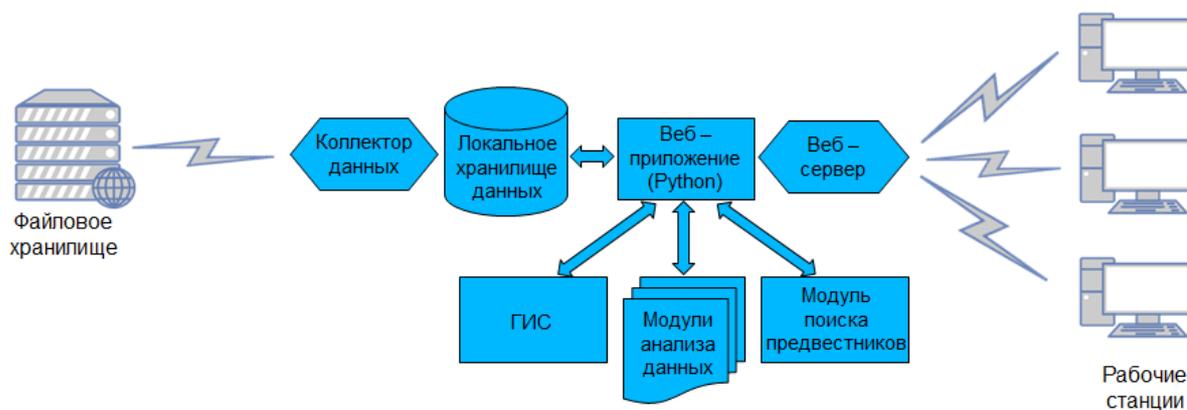


Рисунок 1. Структурная схема ЦП

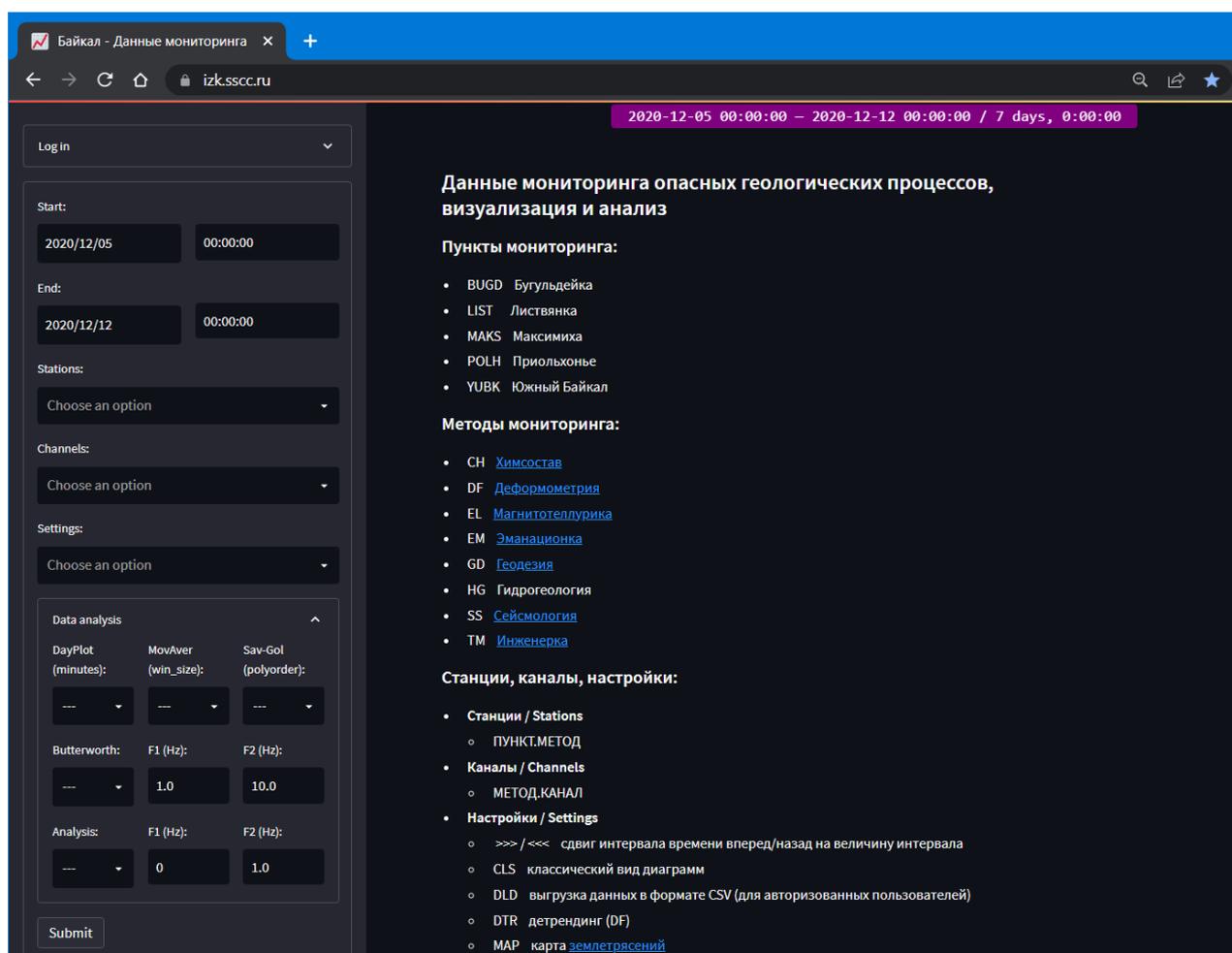


Рисунок 2. Пользовательский интерфейс ЦП. Стартовая страница

Анализ данных осуществляется Модулями анализа данных, набор которых может расширяться. В настоящее время доступны несколько методов фильтрации данных (линейная частотная, Савицкого–Голея и другие), различные методы спектрального и вэйвлет-анализа, мультифрактальный и энтропийный анализ, пространственный анализ данных. Модуль поиска предвестников в настоящее время разрабатывается, в нем планируется использовать как аналитические методы, так и методы машинного обучения.

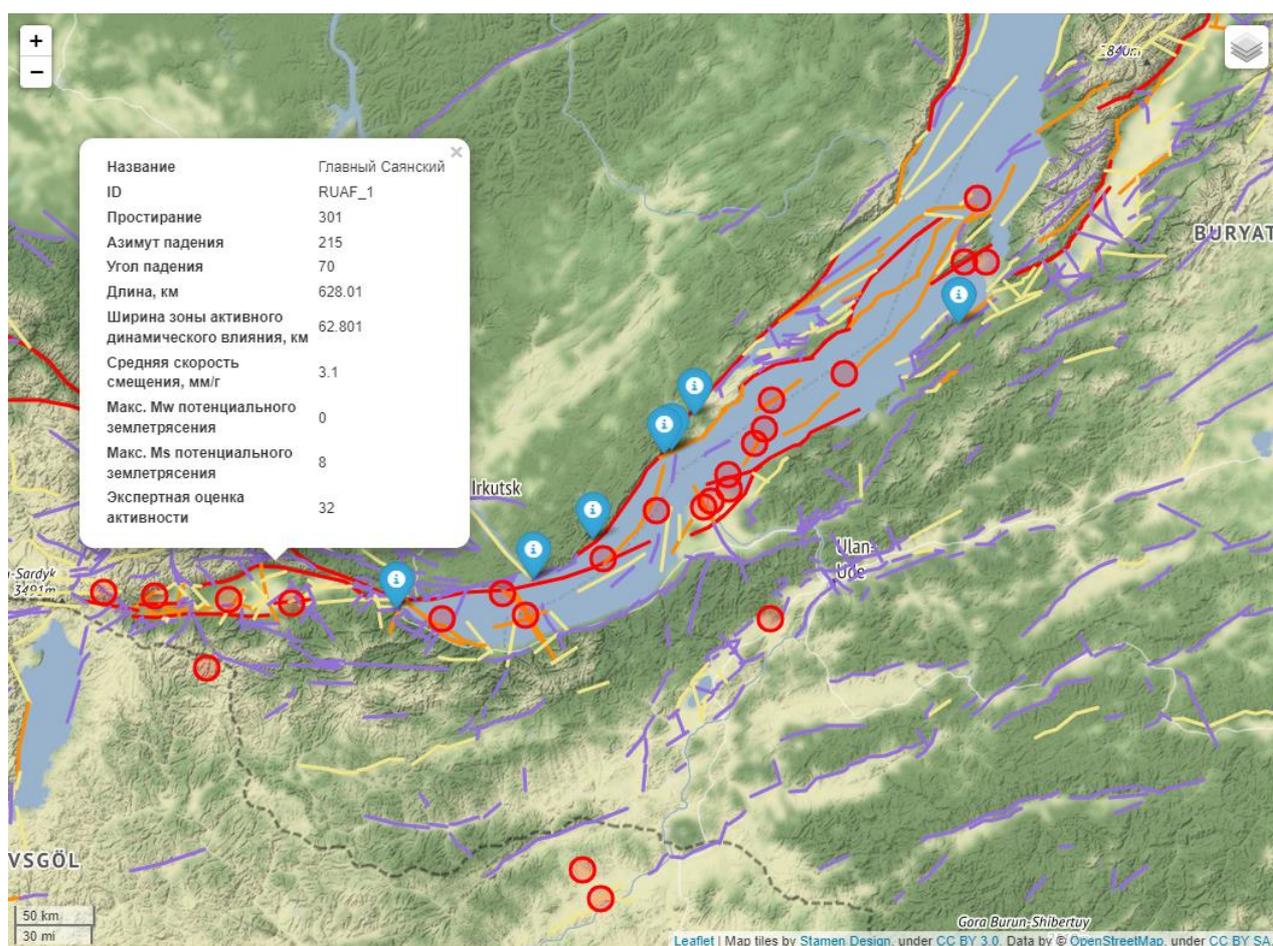


Рисунок 3. Интерфейс ЦП. ГИС

ГИС предназначена для построения интерактивных карт, которые могут включать несколько слоев: землетрясения за выбранный интервал времени [12], геофизические разломы и исторические землетрясения [13], тепловые карты и т. д. Таким образом, можно получать необходимую информацию о предшествующих или последующих аномалиях временных рядов сейсмических событий, а также характеристики активных разломов в районе очага. На рисунке 3 приведен

пример карты с обозначенными пунктами мониторинга, историческими землетрясениями и геологическими разломами, по одному из которых выведена информация во всплывающем окне.

При создании ЦП использовалось только свободно распространяемое программное обеспечение. Бэкенд сервера написан на языке Python с использованием следующих программных библиотек:

- Streamlit — веб-фреймворк;
- Matplotlib — построение 2D и 3D диаграмм;
- NumPy — поддержка многомерных массивов и матриц;
- Pandas, SciPy — научные и инженерные расчеты;
- ObsPy — фреймворк для работы с сейсмологическими данными;
- Folium GIS — ГИС, использующая карты OpenStreetMap.

В настоящее время ЦП функционирует в тестовом режиме и доступна в интернете по адресу <https://izk.sccc.ru>.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦП

Тестовые испытания ЦП начались в феврале 2022 года. Благодаря возможности ЦП обеспечивать комплексное наблюдение на единой временной сетке результатов различных видов геофизического мониторинга (эманационного, деформометрического, геодезического, инженерного-геологического, гидрогеологического, электротеллурического, сейсмологического) удалось повысить оперативность обработки и эффективность взаимодействия исследователей различных направлений мониторинга.

К первым результатам комплексной обработки и сопоставления данных можно отнести выявление краткосрочных предвестников Кударинского землетрясения (9.12.2020, Mw = 5.5) в данных электротеллурического мониторинга полигона Бугульдейка (ряд наблюдений вертикальной компоненты электротеллурического поля — Ez для линии 11 м).

На рис. 4 представлены визуализированные цифровой платформой данные электротеллурического мониторинга в период подготовки Кударинского землетрясения 9 декабря 2020 года.

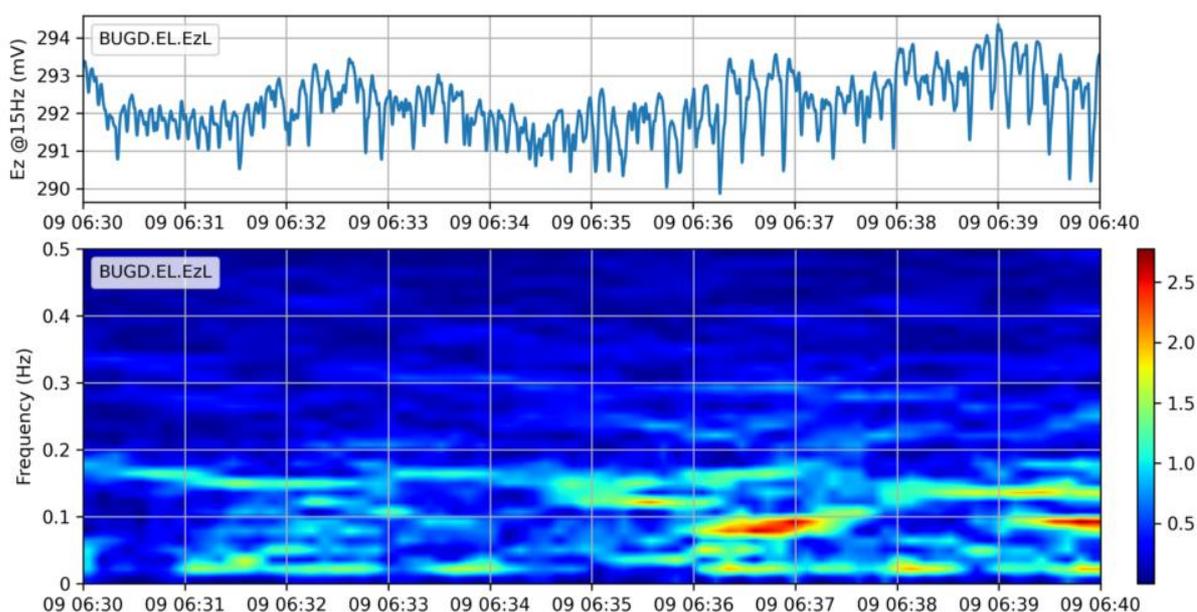


Рисунок 4. Интерфейс ЦП. Ряд наблюдений E_z и спектрограмма

На спектрограмме E_z отчетливо выделяется изменение спектра сигнала примерно за сутки до землетрясения. Характер флуктуаций ряда E_z существенно изменился — вместо хаотичных колебаний появились отчетливые U-образные колебания с частотой 0.5 Гц и относительной амплитудой 1.5–2.5 мВ. В течение около 1.5 ч после их появления амплитуда вариаций несколько увеличивалась, а частота уменьшилась до 0.03 Гц. Важно отметить, что подобные флуктуации не наблюдаются за весь период магнитотеллурических наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная ЦП существенно повышает эффективность исследований с использованием данных комплексного мониторинга. Комлексирование различных методов геофизического мониторинга повышает достоверность прогноза сейсмической активности БПТ.

Дальнейшее развитие ЦП авторы связывают с формализацией экспертных правил и машинным обучением на многолетних рядах, что позволит автоматизировать поиск трендов и аномалий временных рядов данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sudmeier-Rieux K., Jaboyedoff M., Breguet A., Dubois J.* The 2005 Pakistan earthquake revisited: methods for integrated landslide assessment // *Mt. Res. Dev.* 2011. Vol. 31, No. 2. P. 112–120.

2. Землетрясения на Байкале.

URL: http://irkipedia.ru/content/zemletryaseniya_na_baykale

3. *Yong Hwa Oh, Kim G.* A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor // *Sci. Rep.* 2015, No. 5. P. 13084, 10.1038/srep13084

4. Panel on Earthquake Prediction of the Committee on Seismology [C.R Allen, chairman]. *Predicting Earthquakes: A Scientific and Technical Evaluation – with Implications for Society.* National Academy Sciences, Washington, D.C. (July 1976).

5. *Masashi Hayakawa* Fundamentals of Earthquake Prediction 9781118770375, John Wiley and Sons, Singapore (2015).

6. *Levi K.G., Arzhannikova A.V., Buddo V.Yu., Kirillov P.G., Likhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ruzhich V.V., San'kov V.A.*, Recent geodynamics of the Baikal rift // *Razvedka i okhrana nedr.* 1997. No. 1. P. 10–20 (in Russian).

7. *Logachev N.A.*, History and geodynamics of the Baikal rift // *Russian Geology and Geophysics.* 2003. Vol. 44, No. 5. P. 391–406.

8. *Logachev N.A., Florensov N.A.*, The Baikal system of rift basins. In: *The role of rifting in the geological history of the Earth.* Novosibirsk: Nauka, 1977. P. 19–29 (in Russian).

9. *Gol'din S.V., Dyadkov P.G., and Dashevskii Yu.A.* The South Baikal geodynamic testing ground: strategy of earthquake prediction // *Russian Geology and Geophysics,* 2001. Vol. 42, No. 10. P. 1484–1497.

10. *Dyadkov P. G., Melnikova V.I., Nazarov V.I., et al.* The development of seismotectonic and earth quake preparation processes in central. Part of the Baikal Riftzone // *Russian Geology and Geophysics.* 1999. Vol. 40, No. 3. P. 373–386.

11. *Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Перевалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А.* Ком-

плексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты // Геодинамика и тектонофизика. Т. 2022, № 13(5): 0677. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0677>

12. Каталог землетрясений Байкальского филиала ЕГС РАН.

URL: <http://seis-bykl.ru/>

13. Лунина О.В. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры Юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7, № 3. С. 407–434. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215>

A DIGITAL PLATFORM FOR INTEGRATION AND ANALYSIS OF GEOPHYSICAL MONITORING DATA FROM THE BAIKAL NATURAL ZONE

Andrey Grigoryuk^{1[0000-0003-0388-2259]}, Ludmila Braginskaya^{1[0000-0002-3469-3373]},
Igor Seminsky^{2[0000-0002-7530-0716]}, Konstantin Seminsky^{2[0000-0001-7607-0417]},
Valery Kovalevsky^{1[0000-0001-7143-3354]}

¹*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB
RAS, 6, Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090*

²*Institute of the Earth's Crust SB RAS, 128 Lermontova str, Irkutsk, 664033*

¹and@opg.sbcc.ru, ²iks@crust.irk.ru

Abstract

This paper presents a digital platform for complex monitoring data of dangerous geodynamic, engineering-geological and hydrogeological processes occurring in the region of intensive nature management of the central ecological zone of the Baikal natural territory (CEZ BNT). The platform is intended for integration and analysis of data coming from several polygons located within the CEZ BPT in order to assess the state of the geological environment and forecasting of hazardous processes manifestation.

The platform is built on a client-server architecture. Storage, processing and analysis of data is carried out on the server, which users can access via the Internet using a web browser. Several data filtering methods (linear frequency, Savitsky-Goley and others), various methods of spectral and wavelet analysis, multifractal and entropy

analysis, and spatial data analysis are currently available. The digital platform has been tested on real data.

Keywords: *geophysical monitoring, digital platform, precursors, seismic forecast, earthquakes.*

REFERENCES

1. *Sudmeier-Rieux K., Jaboyedoff M., Breguet A., Dubois J.* The 2005 Pakistan earthquake revisited: methods for integrated landslide assessment // *Mt. Res. Dev.* 2011. Vol. 31, No. 2. P. 112–120.
2. Earthquakes on Baikal.
URL: http://irkipedia.ru/content/zemletryaseniya_na_baykale
3. *Yong Hwa Oh, Kim G.* A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor // *Sci. Rep.* 2015, No. 5. P. 13084, 10.1038/srep13084
4. Panel on Earthquake Prediction of the Committee on Seismology [C.R Allen, chairman]. *Predicting Earthquakes: A Scientific and Technical Evaluation – with Implications for Society.* National Academy Sciences, Washington, D.C. (July 1976).
5. *Masashi Hayakawa* *Fundamentals of Earthquake Prediction* 9781118770375, John Wiley and Sons, Singapore (2015).
6. *Levi K.G., Arzhannikova A.V., Buddo V.Yu., Kirillov P.G., Likhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ruzhich V.V., San'kov V.A.,* Recent geodynamics of the Baikal rift // *Razvedka i okhrana nedr.* 1997. No. 1. P. 10–20 (in Russian).
7. *Logachev N.A.,* History and geodynamics of the Baikal rift // *Russian Geology and Geophysics.* 2003. Vol. 44, No. 5. P. 391–406.
8. *Logachev N.A., Florensov N.A.,* The Baikal system of rift basins. In: *The role of rifting in the geological history of the Earth.* Novosibirsk: Nauka, 1977. P. 19–29 (in Russian).
9. *Gol'din S.V., Dyadkov P.G., and Dashevskii Yu.A.* The South Baikal geodynamic testing ground: strategy of earthquake prediction // *Russian Geology and Geophysics,* 2001. Vol. 42, No. 10. P. 1484–1497.
10. *Dyadkov P.G., Melnikova V.I., Nazarov V.I., et al.* The development of seismotectonic and earth quake preparation processes in central. Part of the Baikal Riftzone // *Russian Geology and Geophysics.* 1999. Vol. 40, No. 3. P. 373–386.

11. Seminsky K.Zh., Dobrynina A.A., Borneyakov S.A., Sankov V.A., Pospeev A.V., Ras-skazov S.V., Perevalova N.P., Seminsky I.K., Likhnev A V., Bobrov A.A., Chebykin E.P., Edemsky I.K., Ilyasova A.M., Salko D.V., Sankov A.V., Korol S.A. Comprehensive monitoring of dangerous geological processes in the Baikal region: organization of a pilot network and first results. *Geodynamics and tectonophysics*. 2022;13(5): 0677. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0677>

12. Earthquake catalog of Baikal Branch UGS RAS. URL: <http://seis-bykl.ru/>

13. Lunina O.V. The digital map of the Pliocene – Quaternary crustal faults in the Southern East Siberia and the adjacent Northern Mongolia // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2016. V. 7 (3). P. 407–434), <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



ГРИГОРЮК Андрей Павлович, научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск.

Andrey GRIGORYUK, Researcher of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk.

e-mail: and@opg.sccc.ru

ORCID ID: 0000-0003-0388-2259



БРАГИНСКАЯ Людмила Петровна, ведущий программист Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск.

Lyudmila BRAGINSKAYA, Lead Programmer of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk.

e-mail: ludmila@opg.sccc.ru

ORCID ID: 0000-0002-3469-3373



СЕМИНСКИЙ Игорь Константинович, кандидат геолого-минералогических наук, начальник центра комплексного мониторинга опасных геологических процессов Института земной коры СО РАН, г. Иркутск.

Igor SEMINSKIY, PhD, Head of the Center for comprehensive monitoring of hazardous geological processes, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: iks@crust.irk.ru

ORCID ID: 0000-0002-7530-0716



СЕМИНСКИЙ Константин Жанович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией тектонофизики Института земной коры СО РАН, г. Иркутск.

Konstantin SEMINSKIY, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Laboratory of Tectonophysics, Institute of Terrestrial Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

e-mail: seminsky@crust.irk.ru

ORCID ID: 0000-0001-7607-0417



КОВАЛЕВСКИЙ Валерий Викторович, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск.

Valeriy KOVALEVSKIY, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Science of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk.

e-mail: kovalevsky@sscc.ru

ORCID ID: 0000-0001-7143-3354

Материал поступил в редакцию 25 августа 2022 года

УДК 004.550

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОГО ПОРТАЛА «ИСТОРИЯ ЗЕМЛИ: ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РАКУРС»

А. С. Ерёменко^{1, 2, 3} [0000-0003-1923-8417], **Д. Е. Лещикова**³, **Л. С. Романенкова**³

¹ Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва

² Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

³ Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

academy21@gmail.com, leshchikova.de@dvfu.ru, romanenkova.ls@dvfu.ru

Аннотация

Работа посвящена анализу текущего состояния научно-популярного портала «История Земли: геологический ракурс», перспективам его развития и разработке варианта его дальнейшего развития. Направлением дальнейшего развития этого ресурса будет трансформация структуры представления информации и навигации, в том числе с учётом современных требований к веб-ресурсам.

Ключевые слова: история Земли, геология Земли, научно-популярный портал, популяризация науки, научно-образовательный ресурс.

АКТУАЛЬНОСТЬ

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 21.07.2020 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» цифровая трансформация является одной из пяти национальных целей развития России до 2030 года. Учитывая низкий уровень цифровизации музеев в нашей стране, а также тот факт, что уровень понимания научного знания обществом является достаточно низким, популяризация научного знания становится одной из важных задач, которую необходимо решать с использованием современных цифровых технологий.

Для решения вопроса популяризации достоверного научного знания в интерактивной и динамической формах с 2019 года в Государственном геологическом музее им. В.И. Вернадского РАН ведутся разработка и адаптация современных методов и технологий для Научно-популярного Портала «Живая Земля: геологический ракурс». Портал расположен в интернете: <https://portal.populargeology.ru>.

Текущий вариант Портала предусматривает его информационное наполнение данными из современных научных публикаций и разработок в различных разделах геологии. Нарботанный материал представляет собой уже созданные и создаваемые коллекции геологических артефактов, раскопок и различных реперных геологических объектов, открытых на территории России и за рубежом.

В текущем варианте Портал имеет следующую структуру: а) главная страница с интерактивной линией времени; б) 3D-Земли; в) назад в прошлое. Все три раздела связаны между собой сквозной навигацией, позволяющей контекстно перемещаться между ними. При этом практически вся концепция Портала построена на использовании пользовательских устройств с размерами экрана 10 и более дюймов. Учитывая тот факт, что большая часть потенциальных посетителей использует мобильные устройства, возникает необходимость в пересмотре концепции и навигации Портала, в том числе с целью его адаптации к различным мобильным устройствам.

Таким образом, основная проблема, которая решалась в данной работе, – отсутствие понятной навигации у существующей версии научно-популярного Портала. В связи с этим был проведен ряд их-тестов на широкой выборке потенциальных пользователей, составлена дорожная карта по разработке новой архитектуры Портала, разработаны новые навигационные элементы, макеты, userflow. Также была приведена к единому виду логика изложения материала, что в свою очередь улучшает пользовательский опыт и позволяет пользователю дольше оставаться на ресурсе, изучая предложенный научно-популярный материал. В результате предварительного анализа текущего состояния Портала были сформулированы следующие шаги по разработке нового решения:

- Исследование существующих решений;
- Анализ потребностей потенциальных пользователей;

- Разработка интерфейса модулей и его тестирование;
- Формализация требований и разработка новой структуры фронт-энда.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ РЕШЕНИЯ

Perotmuseum.org

Данный ресурс представляет собой описание музейных экспонатов музея науки и природы «Перо». Сайт выглядит привлекательно и красочно описывает все имеющиеся музейные экспозиции. На сайте имеется механизм вставок с рубрикой «Удивительный факт», в которой показываются случайно выбранные интересные научные факты.

Образовательный геологический сайт Юрия Попова

На данном сайте представлены материалы лекций из курса «Общая геология», которые читает Юрий Попов¹. Основной фокус данного ресурса нацелен на уже действующих студентов-геологов и не привлекает пользователей из других категорий. Из интересных решений можно отметить то, что на сайте широко представлены видеоматериалы и изображения. Фактически это хороший цифровой учебник для студентов, имеющий релевантную информацию для тех, кто хочет изучать геологию глубже. Из минусов данного ресурса – сложная и непонятная организация структуры сайта.

Все о Геологии

Данный ресурс также нацелен на студенческую аудиторию [1]. На нем представлен большой объём геологических данных. Его преимуществом являются хорошо структурированная информация, а также возможность совместного написания научных публикаций.

¹ Доцент кафедры месторождений полезных ископаемых Института наук о Земле Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону), кандидат геолого-минералогических наук [3].

Самоцвет Байкала

Этот сайт – шаг к цифровизации геологического музея [2]. На сайте представлена галерея минералов из коллекций музея, что привлекает внимание пользователей. Также на ресурсе представлена история музея с информацией о месторождениях минералов Южного Прибайкалья и Слюдянского района.

TikTok²

Данный сервис представляет собой социальную сеть с короткими видеороликами длиной до 5 минут. На конец июня 2021 года он имел более 2,9 млрд активных пользователей ежемесячно³. Пользователи активно делятся информацией о минералах, камнях и в целом научными геологическими фактами в научно-популярном жанре, что привлекает внимание пользователей.

YouTube.com

Этот ресурс является видеохостингом, не имеет ограничений по времени и размеру видеороликов. На YouTube представлена масса видео на различные геологические темы, начиная от информации в научно-популярном жанре и заканчивая лекциями и научными исследованиями людей со всего мира. Данный ресурс позволяет найти видео практически на любую тему.

ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ

Проект ставит своей основной целью популяризацию с использованием современных информационных технологий современных научных геологических знаний по истории Земли путём представления их на интернет-портале, в музейных экспозициях и на передвижных музейных выставках. Важной целью при переработке текущей версии Портала [3] должны являться адаптивность и структурированность пользовательского интерфейса, современные способы визуализации различных видов информации, а также простота подачи информации.

² Сервис для создания и просмотра коротких видео, принадлежащий пекинской компании «ByteDance»;

³ Ведомости [Электронный ресурс].

<https://www.vedomosti.ru/technology/news/2021/09/27/888487-ezhemesyachnaya-auditoriya-tiktok-previsila-1-mlrd>

ПРОЕКТ ПОРТАЛА

Для реализации цели функционирования дополнительной версии Портала были разработаны следующие функциональные требования.

Главная страница. Этот модуль должен позволять пользователю:

- выбирать время;
- выбирать инструмент;
- переходить на другие страницы;
- осуществлять навигацию по футеру;
- изменять выбранное время;
- изменять выбранный инструмент.

3D-Земля. Этот раздел должен позволять пользователю:

- изменять время;
- изменять инструмент;
- видеть выбранное время;
- видеть выбранный инструмент;
- видеть информацию о Земле;
- осуществлять навигацию во времени одним кликом;
- переходить на главную страницу;
- вращать 3D-Землю с помощью мыши;
- получить справку по дополнительной информации.

Назад в прошлое. Это каталог мест, который должен позволять пользователю:

- изменять время;
- изменять инструмент;
- выбирать точку для изучения истории рельефа;
- просматривать местоположения;
- переходить на главную страницу;
- осуществлять навигацию во времени одним кликом;

Назад в прошлое. Это каталог времени, который должен позволять пользователю:

- выбирать время;
- выбирать инструмент;
- возвращаться к выбору местоположения;
- выбирать статью;
- пролистывать различные статьи;
- осуществлять навигацию по времени одним кликом;
- видеть название статьи;
- видеть статьи в хронологическом порядке.

Назад в прошлое. Это страница с информацией о выбранном месте и времени, она должна позволять пользователю:

- выбирать время;
- возвращаться к местоположению по крошкам;
- возвращаться к местоположению по кнопке;
- выбирать время;
- выбирать инструмент;
- видеть другие статьи по выбранному времени;
- видеть название статьи;
- видеть зон/эру/период, когда совершалось событие.

Для реализации проекта было принято решение использовать компонентный подход. Такое решение позволяет многократно использовать созданные компоненты кода, а также быстро исправлять возникающие ошибки в работе кода.

Для реализации основных идей Портала был разработан макет его новой версии в виде низко детализированных прототипов. В качестве фреймворка, реализующего компонентный подход, был выбран Vue.js версии 3. Данный фреймворк имеет хорошую документацию и низкий порог входа. Также vue.js версии 3 является достаточно производительным для большинства клиентов.

ПОКОМПОНЕНТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПОРТАЛА

Перед разработкой новой версии интерфейса проводилось глубинное интервью [6] для более чёткого понимания потребностей будущих пользователей. Среди потенциальных групп пользователей были выбраны в первую очередь школьники и студенты как довольно широкая аудитория, интересующаяся новыми знаниями. Далее приведена развёрнутая покомпонентная схема представления макетов новой структуры Портала.

Главная страница (рис. 1)

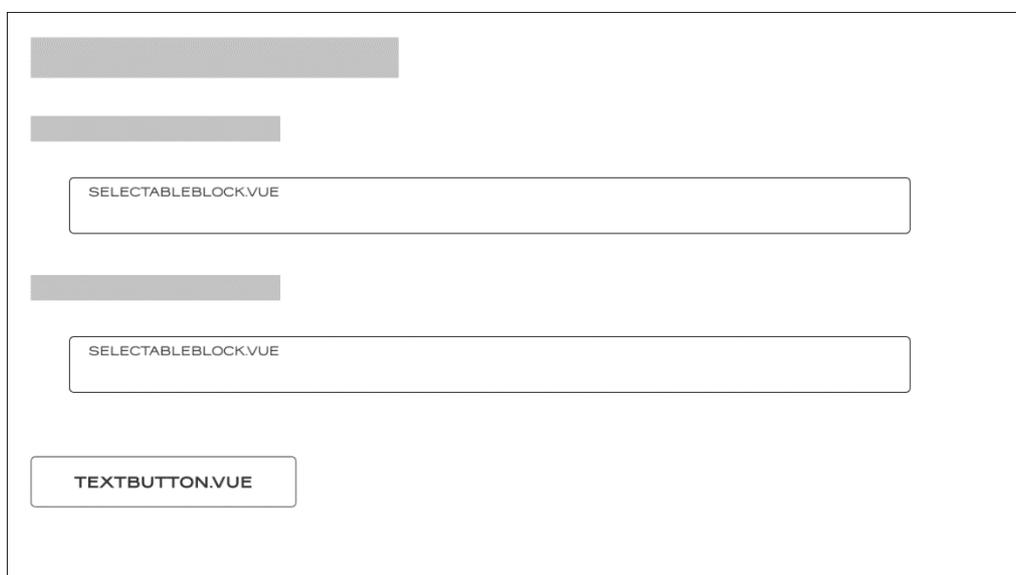


Рисунок 1. Покомпонентный прототип главной страницы. Разрабатываемый компонент – HomePage.vue

3D-Земля (рис. 2)

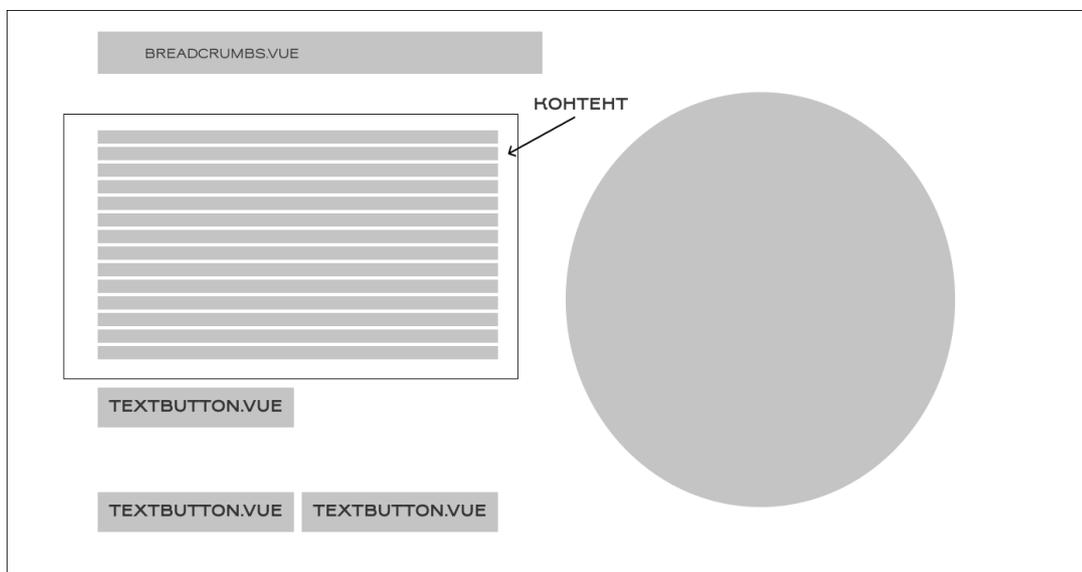


Рисунок 2. Покомпонентный прототип страницы с 3Д землей. Разрабатываемый компонент – EarthPage.vue

История рельефа, каталог мест (рис. 3)

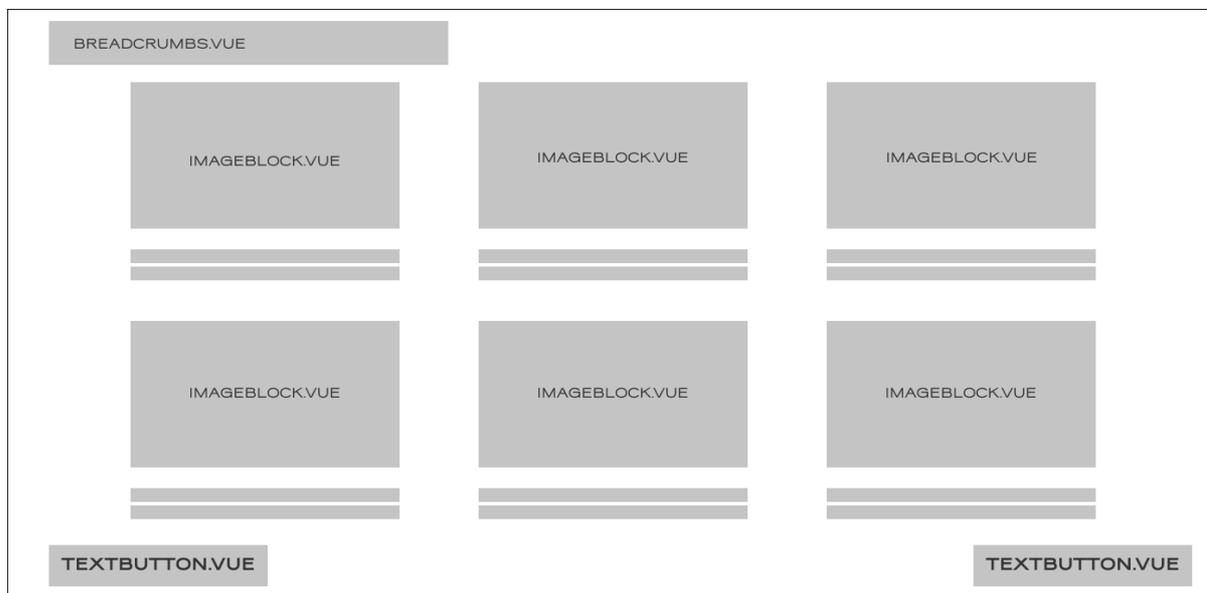


Рисунок 3. Покомпонентный прототип с каталогом мест для истории рельефа.

История рельефа, страница рельефа (рис. 4)

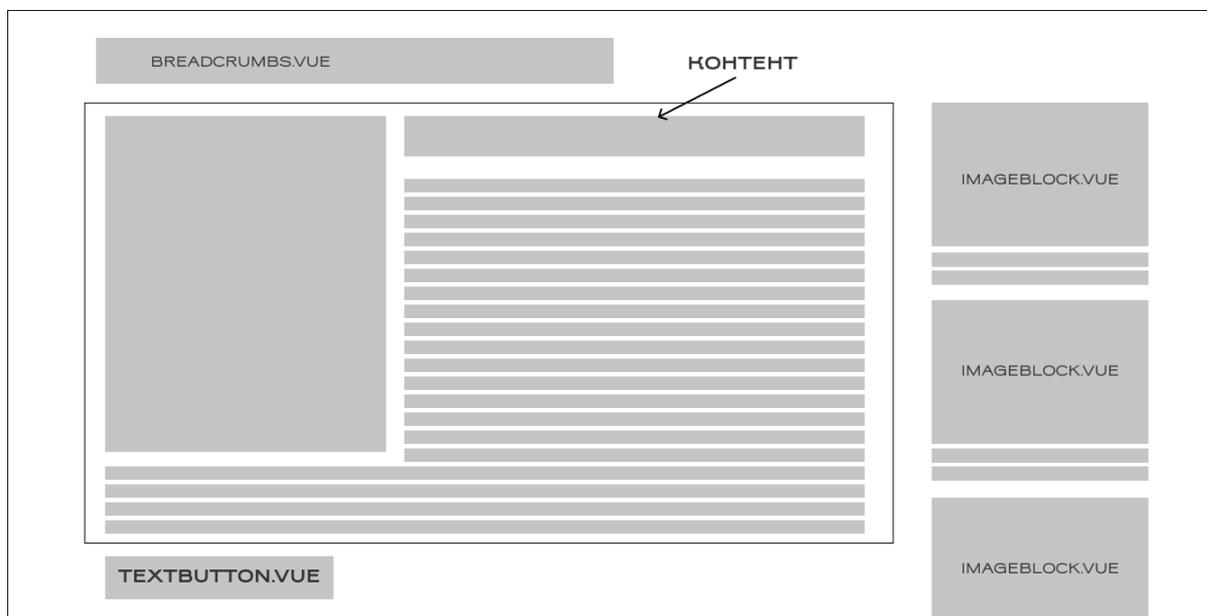


Рисунок 4. Покомпонентный прототип страницы истории рельефа.

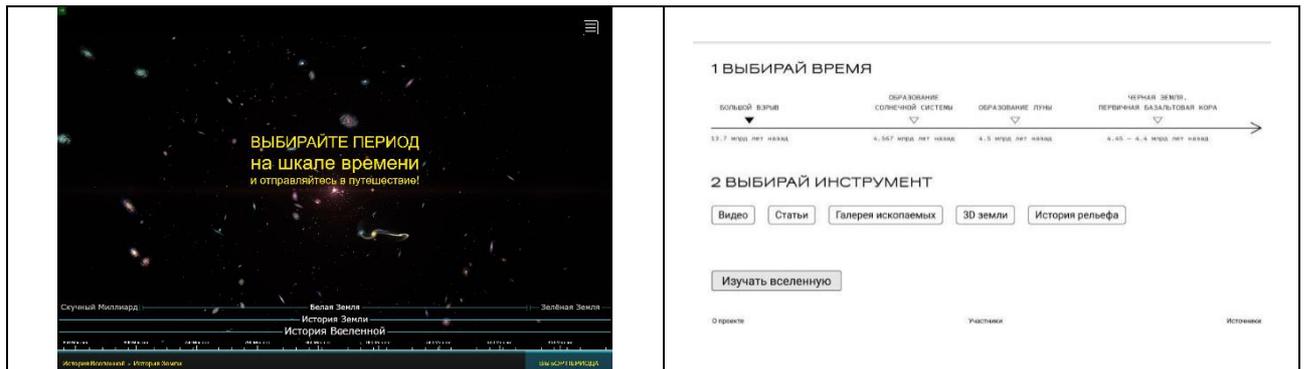
ПРОЕКТ ИНТЕРФЕЙСА

На основании результатов проведённых опросов были разработаны макеты низкой детальности. В первую очередь была разработана функциональная архитектура Портала, рассчитанная на упрощение доступа ко всем инструментам. После того, как все инструменты были линейно разложены по схеме, проводилась работа с макетами.

Главная страница

На главной странице было решено сохранить шкалу времени.

Страница до изменений	Низкодетальный прототип
-----------------------	-------------------------



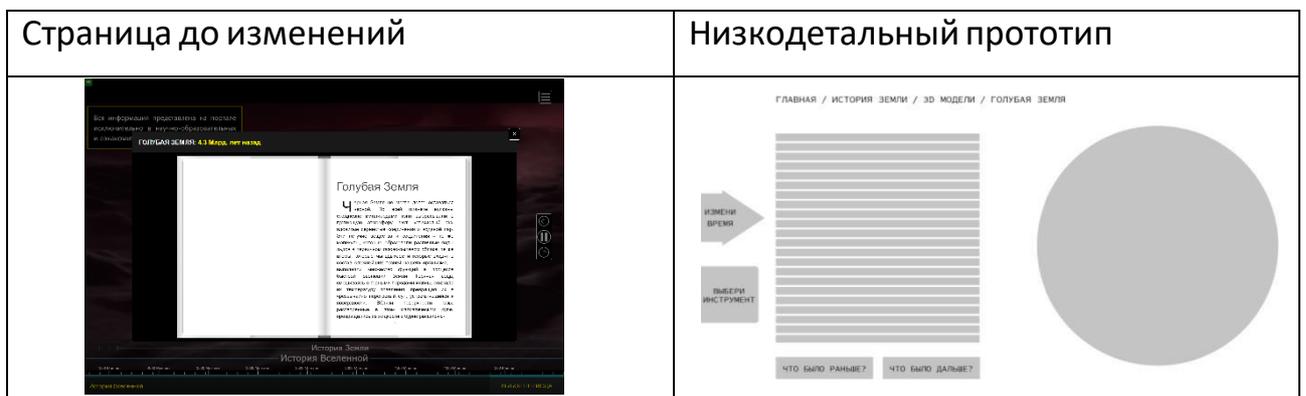
3D-Земли

Раздел с 3D-Землями получил минорные модификации, по сравнению с Главной страницей.



При коридорном тестировании [5] было выявлено, что боковая навигация не эффективна. От неё было решено отказаться. Также было решено упростить навигацию со всех страниц по хлебным крошкам, что существенно упрощает пользовательский опыт.

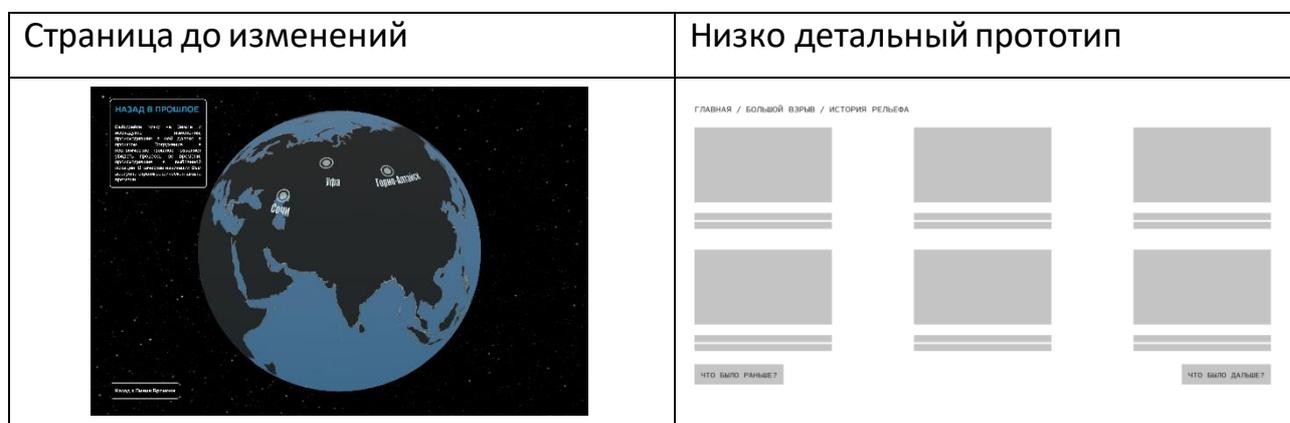
Раздел «Узнать больше» в 3D-Землях



Для данного раздела не проводилось коридорное тестирование. Структура страницы была создана по общим принципам новой структуры макетов.

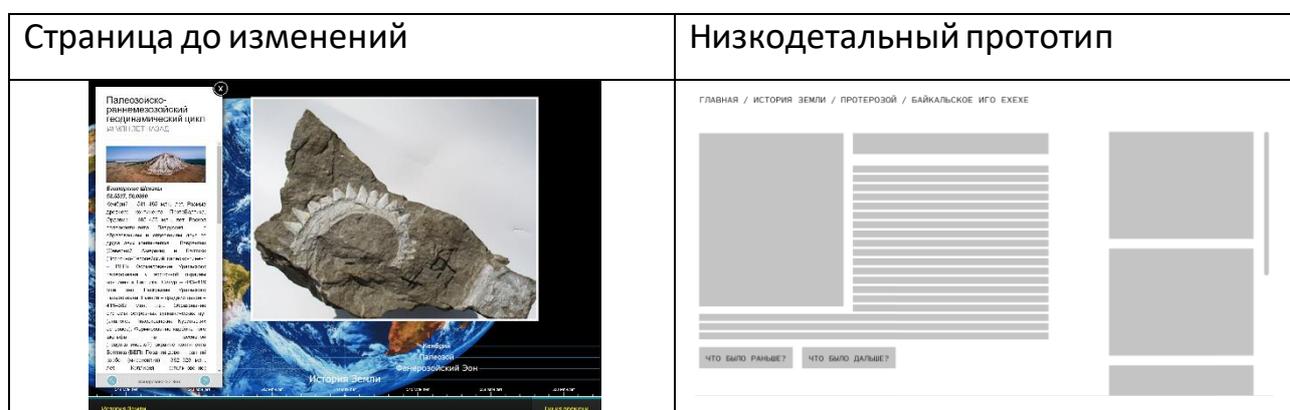
Раздел «История рельефа»

Механизм выбора точки на Земле был представлен в виде 3D-глобуса с нанесёнными опорными точками. Для унификации механизма было принято решение представить выбор местоположения в виде карточек.



Данное представление призвано облегчить навигацию при масштабировании проекта.

Информация по выбранным времени и месту



Такая статейная реализация помогает пользователю обратить внимание на самое главное – собранную информацию. Также она значительно упрощает действие по целевой функции – чтение статьи. При этом добавляется удобная навигации одним кликом по кнопкам «Что было раньше?» и «Что было дальше?». Блоки с правой стороны показывают смежные статьи по времени, что приносит дополнительные просмотры по другим статьям раздела.

Прототип нового интерфейса

На основе разработанных низко детализированных макетов был разработан прототип нового интерфейса Портала (рис. 5).

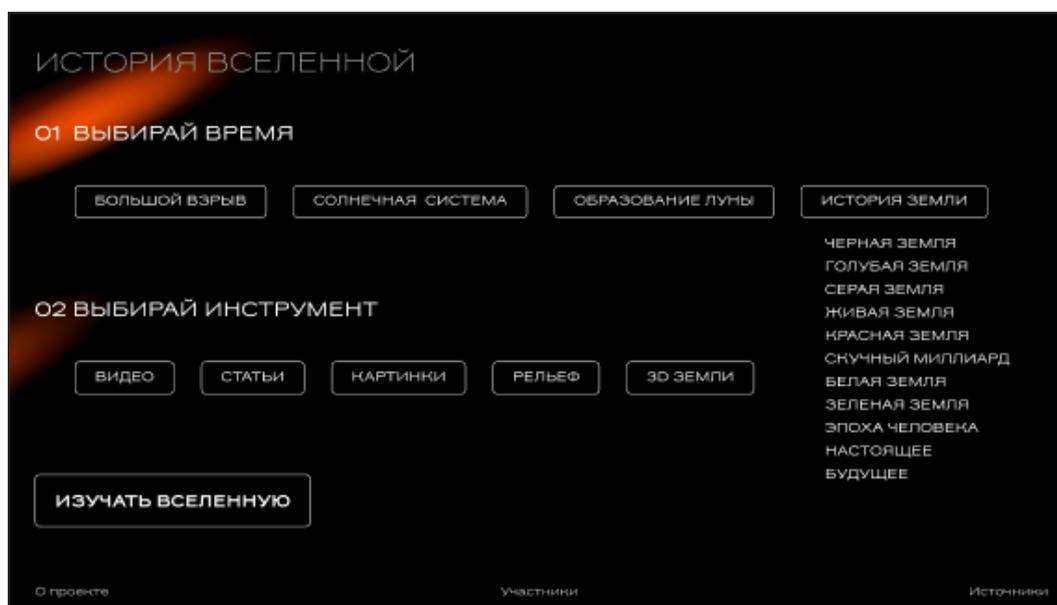


Рисунок 5. Прототип главной страницы Научно-популярного Портала.

Все кнопки на данной странице имеют 4 состояния:

- Нормальное
- Наведенное
- Нажатое
- Недоступное

Визуально данная страница разделяется на 4 блока:

- 1-й блок – имеет временное значение;
- 2-й блок – отвечает за доступные инструменты;

- 3-й блок – кнопка «Изучать вселенную». Данная кнопка является стартовой.

- 4-й блок – футер. Он присутствует только на главной странице.

При наведении на кнопку «История Земли» появляется список доступных периодов времени (аналог изначального Таймлайна в первой версии Портала). После выбора промежутка времени подсвечиваются дополнительные инструменты во 2-м блоке, а именно: «Рельеф» и «3D-Земли».

3D-Земли

На данной странице расположены кнопки «Что было раньше?» и «Что было дальше?». Кнопки имеют 3 состояния:

- Нормальное
- Наведенное
- Недоступное

Также на данной странице (рис. 6) расположена кнопка «Узнать больше», при клике на которую откроется экран с дополнительной информацией о выбранной Земле.

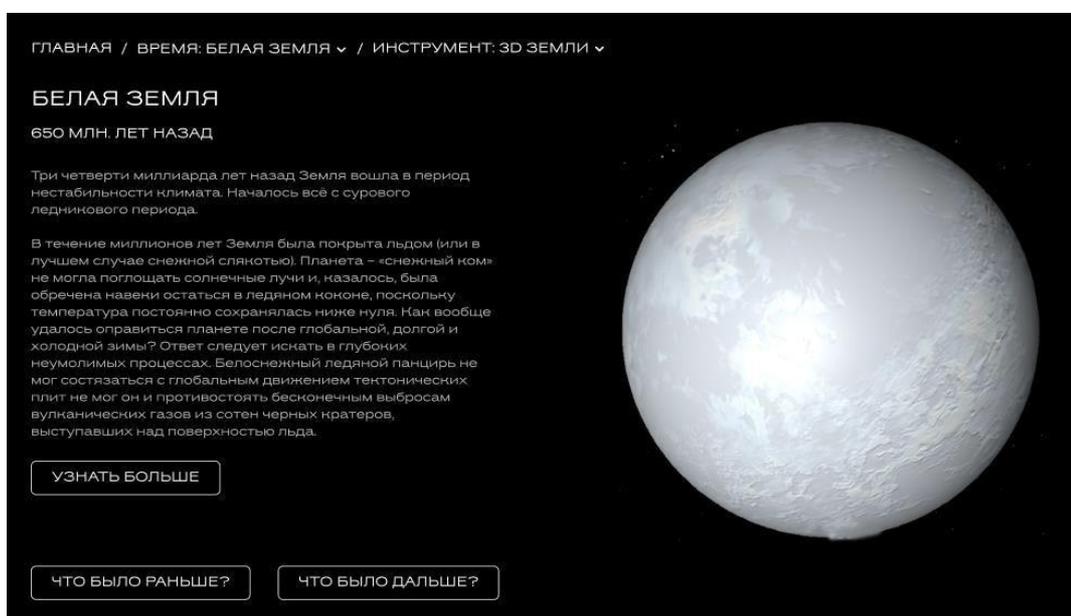


Рисунок 6. Страница с 3D-Землей и информацией о ней.

Инструмент «Узнать больше»

При нажатии на кнопку «Узнать больше» осуществляется переход к более развёрнутому описанию Земли в данном периоде времени (рис. 7). Строчки «Содержание» и «Источники» предназначены для навигации по текущему текстовому описанию и указанию источника информации.



Рисунок 7. Страница с более детальным описанием выбранного периода времени.

Каталог мест

На данной странице указаны все места, в которых на выбранный период времени имеется информация для изучения её в разрезе геологического времени. Точки представлены в виде карточек (рис. 8).

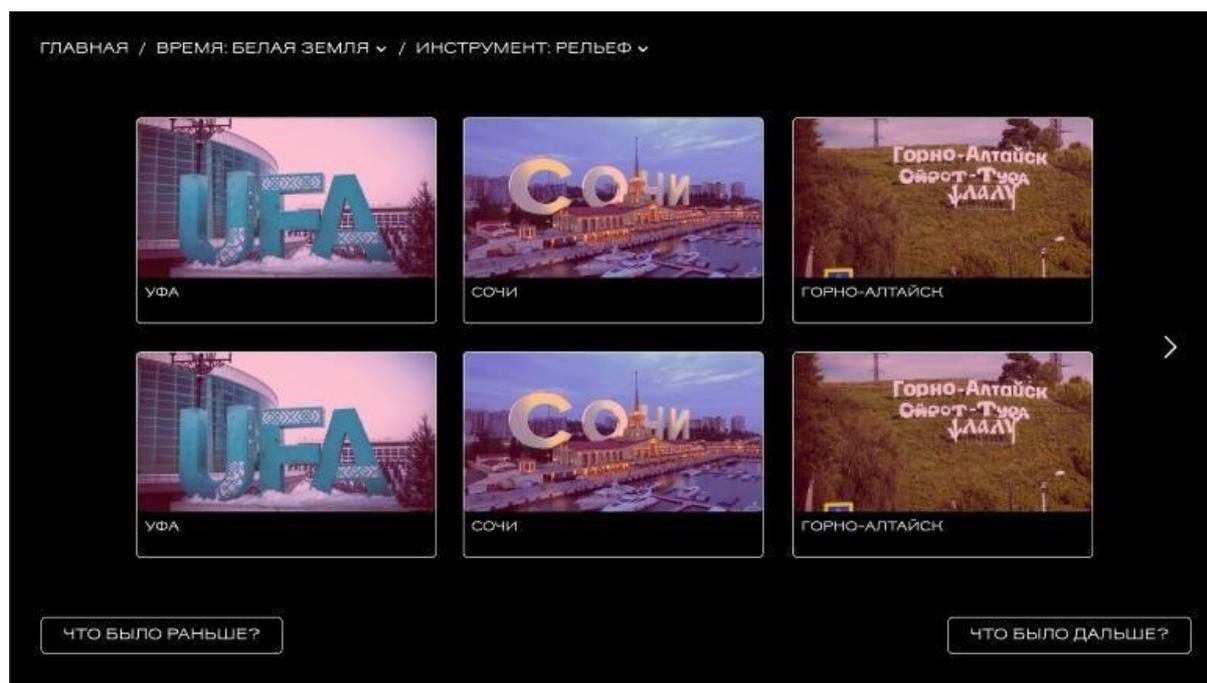


Рисунок 8. История рельефа. Каталог всех мест для погружения.

Каталог времени

На данной странице появляется возможность выбора конкретного времени для изучения информации о нём. В предыдущей версии Портала навигация проходила относительно эонов. Это достаточно крупные отрезки времени. Они могут разделяться на эры, периоды и эпохи. Это в свою очередь могло затруднять навигацию для неискушенного пользователя ресурса, в связи с чем было принято решение не выносить их в основную навигацию, а использовать режим каталога (рис. 9).

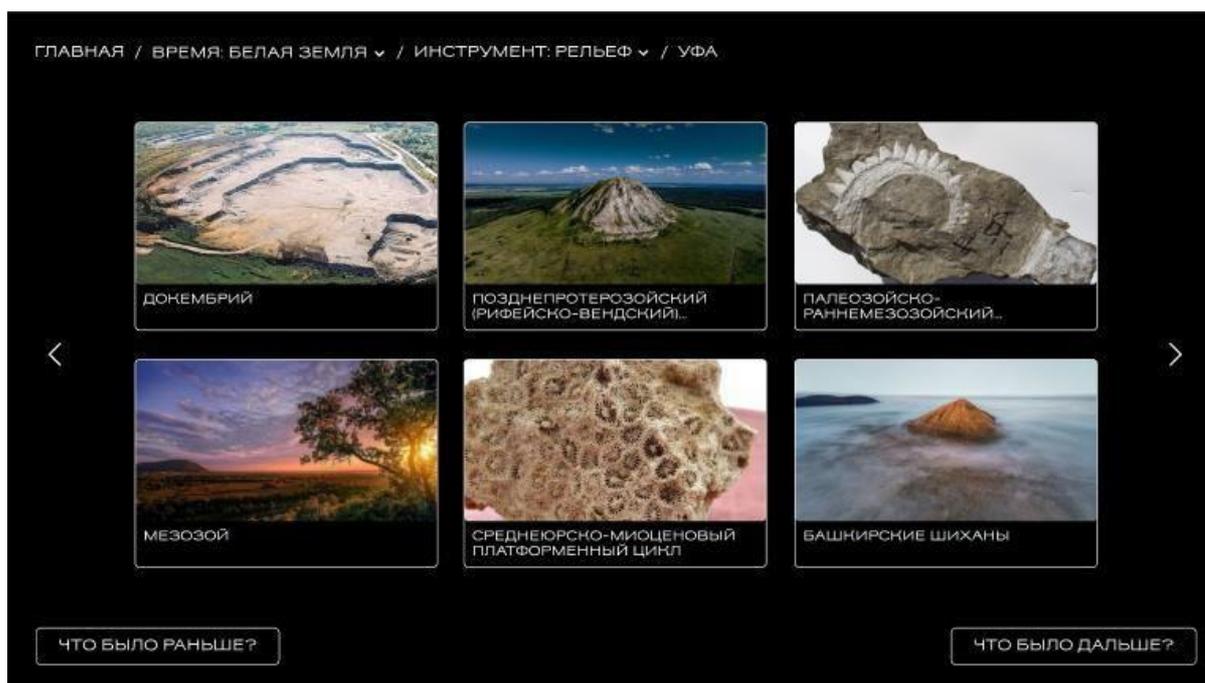


Рисунок 9. История рельефа. Выбор времени.

При выборе соответствующего периода времени внутри конкретной точки мы попадаем на страницу с её описанием. Данная страница сделана по общим принципам, как в описании 3D-Земель (рис. 10).



Рисунок 10. История рельефа. Страница с информацией о выбранном месте и времени.

Работы выполняются в рамках Государственного задания ГГМ РАН по Теме № 0140-2019-0005 «Разработка информационной среды интеграции данных естественнонаучных музеев и сервисов их обработки для наук о Земле», а также Государственной темы № 1021061009468-8-1.5.1 «Цифровая платформа интеграции и анализа геологических и музейных данных».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Все о Геологии [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://geo.web.ru/> (Дата последнего обращения 11.10.2021);
2. Самоцвет Байкала частный музей минералов Жигалова [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.baikalgem.ru/index.html> (Дата последнего обращения 11.10.2021);
3. Популярная геология [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://populargeology.ru/> (Дата последнего обращения 08.06.2022);
4. Открытый образовательный геологический ресурс [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://porovgeo.sfedu.ru/> (Дата последнего обращения 08.06.2022);
5. Гайд по коридорным тестам [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://vc.ru/marketing/100883-poydem-vyydem-podrobnyy-gayd-po-koridornym-testam> (Дата последнего обращения 27.04.2022);
6. Как подготовиться к глубинным интервью [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://sense23.com/post/gajd-kak-podgotovitsya-k-glubinnyim-intervyu-i-provesti-ih-maksimalno-effektivno> (Дата последнего обращения 27.04.2022)

DESIGN FOR THE FURTHER DEVELOPMENT OF THE POPULAR SCIENCE PORTAL "HISTORY OF THE EARTH: GEOLOGICAL PERSPECTIVE"

Aleksandr Eremenko^{1,2,3}, Darya Leshikova³, Ludmila Romanenkova³

¹ Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow

² Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok

³ Far Eastern Federal University, Vladivostok

academy21@gmail.com, leshchikova.de@dvfu.ru, romanenkova.ls@dvfu.ru

Abstract

This paper discusses analysis of the current state of the popular scientific Portal “History of the Earth: geological perspective”, the prospects for its development and options overview for its further development. The direction of further development of this resource will be the transformation of the structure of information presentation and navigation on the basis of modern requirements for web resources.

Keywords: *history of the Earth, geology of the Earth, popular science portal, popularization of science, scientific and educational resource*

REFERENCES

1. Vse o Geologii [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://geo.web.ru/> (Data poslednego obrashcheniya 11.10.2021);
2. Samocvet Bajkala chastnyj muzej mineralov ZHigalova [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <http://www.baikalgem.ru/index.html> (Data poslednego obrashcheniya 11.10.2021);
3. Populyarnaya geologiya [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://populargeology.ru/> (Data poslednego obrashcheniya 08.06.2022);
4. Otkrytyj obrazovatel'nyj geologicheskij resurs [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://popovgeo.sfedu.ru/> (Data poslednego obrashcheniya 08.06.2022);
5. Gajd po koridornym testam [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://vc.ru/marketing/100883-poydem-vyydem-podrobnyy-gayd-po-koridornym-testam> (Data poslednego obrashcheniya 27.04.2022);
6. Kak podgotovit'sya k glubinnym interv'yu [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://sense23.com/post/gajd-kak-podgotovitsya-k-glubinnym-intervyu-i-provesti-ih-maksimalno-effektivno> (Data poslednego obrashcheniya 27.04.2022)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



ЕРЕМЕНКО Александр Сергеевич – кандидат технических наук старший научный сотрудник лаборатории спутникового мониторинга Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН.

Aleksandr EREMENKO – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences, Satellite Monitoring Laboratory, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

email: academy21@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1923-8417



ЛЕЩИКОВА Дарья Евгеньевна – выпускница ИМКТ ДВФУ.

Daria LESHCHIKOVA – graduate of IMCT FEFU.

email: leshchikova.de@dvfu.ru



РОМАНЕНКОВА Людмила Сергеевна – выпускница ИМКТ ДВФУ.

Lyudmila ROMANENKOVA – graduate of IMCT FEFU.

email: romanenkova.ls@dvfu.ru

Материал поступил в редакцию 31 октября 2022 года

УДК 004.550

СОЗДАНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ ПО ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ГЕОЛОГИИ

В. С. Ерёменко¹[0000-0002-5250-5743], В. В. Наумова²[0000-0002-3001-1638]

Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва

¹ vitaer@gmail.com, ² naumova_new@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены разнородные территориально-распределённые вычислительные системы по обработке геологических данных и подходы по организации взаимодействия с этими системами. Исследуемые системы классифицированы на несколько групп, исходя из принципов их функционирования и выбранных технологических решений. Для каждого типа систем приведено описание их основных свойств, включая возможные способы для взаимодействия.

На основе проведённого анализа предложен подход к организации единого рабочего пространства с доступом к разнородным территориально-распределённым вычислительным системам в рамках общей экосистемы. Описаны архитектура предлагаемой экосистемы и правила взаимодействия её участников. Продемонстрирован программный прототип, реализующий названные принципы, на примере нескольких разнородных систем по обработке геологической информации.

Ключевые слова: вычислительно-аналитическая среда, облачные сервисы, веб-сервисы, программные платформы

ВВЕДЕНИЕ

Использование внешних сервисов вместо пользовательских приложений позволяет проводить обработку данных на оборудовании, наиболее приспособленном для соответствующей задачи. Тем самым обработка данных происходит более эффективно, а пользователь получает возможность обрабатывать данные

наиболее актуальными версиями алгоритмов, используя для этого веб-интерфейс, без необходимости установки, настройки и поддержки программного обеспечения для обработки у себя на персональном компьютере.

В Государственном Геологическом Музее им. В.И. Вернадского РАН с 2018 года разрабатывается вычислительно-аналитическая Среда для поддержки научных исследований в геологии [1]. Она предоставляет пользователям единую точку доступа к территориально-распределённым вычислительным узлам для проведения научных исследований.

ПРОГРАММНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ПО ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ

Для организации взаимодействия с различными инструментами по анализу данных необходимо провести их классификацию по различным критериям. Можно выделить следующие основные критерии:

1. По типу взаимодействия:

- Настольное (standalone) приложение;
- Приложение «клиент-сервер»
 - Веб-приложение (клиент – веб-браузер);
 - Настольный клиент;
- Программное API
 - Набор библиотек;
 - Веб-сервис (Web-API);
 - Сервис с собственным протоколом доступа;

2. По типу архитектуры вычислительного узла:

- Виртуальный / традиционный сервер;
- Облачная архитектура;
- Суперкомпьютер;
- Распределённая сеть вычислительных кластеров (GRID);

3. По типу инструмента обработки:

- Приложение;
 - Программная платформа;
 - Аппаратно-программная инфраструктура;
4. По разграничению доступа:
- Публичный;
 - Частный;
 - Гибридный.

ВЕБ-СЕРВИСЫ

Подход к построению информационных систем с использованием веб-сервисов в качестве независимых компонентов со стандартизированными интерфейсами и протоколами взаимодействия называется сервис-ориентированной архитектурой (SOA – service-oriented architecture).

Наиболее часто встречаются программные комплексы на базе протокола SOAP (Simple Object Access Protocol) или с использованием интерфейсов на основе архитектуры REST (Representational State Transfer).

SOAP – это протокол обмена структурированными сообщениями в распределённой вычислительной среде. Согласно этому протоколу сообщения в формате XML помещаются в SOAP-конверт для дальнейшей передачи сообщения получателю. Чаще всего протокол SOAP реализуется на основе протокола HTTP (HyperText Transfer Protocol).

Более современный подход к построению веб-сервисов подразумевает использование REST-архитектуры. Как и большинство SOAP-сервисов, REST-сервисы реализуются на основе протокола HTTP. Обычно веб-сервисы на основе REST-архитектуры используют для взаимодействия сообщения в формате JSON (Javascript Object Notation).

Стандарт WSDL разработан для веб-сервисов на основе протокола SOAP (Simple Object Access Protocol), предназначенного для обмена XML (eXtensible Markup Language) сообщениями.

В настоящее время множество веб-сервисов по обработке и анализу научных данных использует другие технологии реализации интерфейсов, в частности, интерфейсы на основе REST-архитектуры.

ПЛАТФОРМЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА

Развитие облачных сервисов в последнее десятилетие изменило подход к предоставлению различных информационных услуг. Согласно работе [2], облачные сервисы можно разделить на три основные группы:

- Программное обеспечение как сервис (Software as a Service, SaaS);
- Платформа как сервис (Platform as a Service, PaaS);
- Инфраструктура как сервис (Infrastructure as a Service, IaaS).

Одним из крупнейших поставщиков сервисов по обработке пространственных данных является компания ESRI с линейкой продуктов ArcGIS (<https://www.arcgis.com/>). Облачная платформа ArcGIS Online позволяет пользователям получить доступ к различным функциям обработки и анализа пространственных данных непосредственно через веб-браузер, без необходимости установки и обслуживания локального программного обеспечения. Платформа позволяет загружать пользовательские данные непосредственно с компьютера либо из внешней базы пространственных данных для дальнейшей работы с этими данными в интерактивном режиме. Существует возможность реализации и публикации собственных методов обработки и анализа пространственных данных в общем каталоге сервисов обработки ArcGIS.

Одним из наиболее популярных программных продуктов обработки табличных данных в интерактивном режиме является Excel из пакета Microsoft Office. Этот программный продукт содержит ряд инструментов для редактирования данных, построения различных диаграмм, использования встроенных процедур анализа и создания собственных данных. Компания Microsoft разработала бесплатную облачную версию продукта Excel (<https://www.office.com/>). Зарегистрированный пользователь может использовать полноценную веб-версию для обработки данных, расположенных в облачном хранилище Microsoft One Drive.

Для анализа пространственных данных наиболее подходящим инструментом являются геоинформационные системы (ГИС), позволяющие в интерактивном режиме взаимодействовать с объектами на карте, применяя к отдельным

слоям и объектам доступные средства анализа. Наиболее подходящим для геологии облачным решением является ArcGIS Online, разрабатываемый компанией ESRI. Portal for ArcGIS – это инфраструктура ArcGIS Online, функционирующая в защищенной ИТ-среде или в частном облаке организации (под контролем сетевого экрана или в полностью изолированной локальной сети). Портал позволяет создавать карты, каталогизировать и анализировать пространственные данные с помощью удобного интуитивно понятного интерфейса. Создание и публикация интерактивных карт и приложений могут выполняться на любом устройстве при наличии браузера и доступа к интернету. Публикация данных в защищенном облаке Esri в виде кэшированных или динамических сервисов соответствует всем современным стандартам защиты информации с сохранением всех авторских прав.

Для анализа спутниковых данных одним из лидеров среди облачных сервисов является платформа Earth Engine компании Google (<https://earthengine.google.com/>). Эта платформа позволяет пользователю загружать собственные данные или использовать данные из каталога Earth Engine для дальнейшей обработки в интерактивном режиме. В каталоге содержатся продукты обработки данных радиометра Modis (спутники Aqua, Terra), спутников Sentinel-1A, Sentinel-1B, Sentinel-2A, Sentinel-2B, Landsat 8 и др. Earth Engine содержит ряд предустановленных алгоритмов анализа, а также инструменты для их создания, редактирования и запуска с использованием языков программирования Javascript и Python. Для работы пользователю необходимо наличие аккаунта Google. Для анализа и обработки можно использовать данные из облачного хранилища Google.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ СРЕДЫ

Развитие технологии облачных вычислений способствует появлению большого количества веб-сервисов по обработке разнородных данных. Среди них есть как коммерческие, так и открытые программные комплексы, разрабатываемые в научных организациях или различных интернет-сообществах.

Возможность использования таких программных комплексов в виде веб-сервисов позволяет создавать предметно-ориентированные виртуальные аналитические среды, объединяющие внутри себя набор веб-сервисов для решения

комплекса задач в рамках предметной области. Такие среды используют существующие внешние вычислительные узлы для обработки пользовательских данных, не требуя при этом больших вычислительных мощностей, в отличие от информационных систем, реализующих алгоритмы обработки данных внутри себя.

В настоящее время актуальной является разработка тематических вычислительно-аналитических сред, имеющих единые точки доступа к территориально распределенным вычислительно-аналитическим ресурсам, позволяющие в рамках единой системы решать различные задачи по обработке и анализу в заданной предметной области.

В [3] предложена концепция распределённой информационно-аналитической среды для исследований экологических систем: описана модель виртуальной среды, определены категории данных и объекты среды и приведен пример схемы среды с описанием используемых технологий.

В [4] представлен проект создания тематической виртуальной исследовательской среды для анализа, оценки и прогнозирования воздействия глобального изменения климата, который разрабатывается с целью обеспечения свободного доступа к различным ресурсам данных и службам обработки через веб-браузер.

В работе [5] дан общий обзор существующих виртуальных исследовательских сред, выделены общие и отличительные особенности различных подходов к построению таких сред и разобраны проблемы, которые необходимо решать в данной области.

В [6] разработана успешно функционирующая среда WPS-сервисов обработки геоданных. Она поддерживает вызов сервисов обработки, построенных с использованием интерфейса OGC WPS (Web Processing Service). Реализована возможность построения цепочек обработки с использованием языка javascript для формирования сценария обработки.

ИНТЕГРАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕДИНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Для организации взаимодействия с внешними веб-сервисами, работающими по принципу запрос–ответ, была выбрана платформа на основе сервиса запуска процессов обработки пространственных данных на базе международного стандарта OGC Web Processing Service (WPS). Этот стандарт дает возможность за-

пуска как отдельных процессов обработки, так и цепочек этих процессов, выполняя их в последовательном или параллельном режимах, передавая при этом результат выполнения одного или нескольких процессов в качестве входных параметров для другого процесса.

ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЩЕЙ ШИНЫ ДАННЫХ

Каждый из перечисленных облачных сервисов использует собственные уникальные протоколы взаимодействия, сильно затрудняя возможность интеграции сервиса в разрабатываемую вычислительную Среду на основе общего протокола доступа.

Некоторые облачные сервисы требуют наличия данных в их собственном хранилище. Например, при использовании Excel из MS Office Online данные должны находиться в пользовательском хранилище One Drive. Использование Earth Engine позволяет также использовать данные из облачного хранилища Google на аккаунте пользователя. Таким образом, для обеспечения «бесшовного» перехода между облачными сервисами необходимо разработать набор процедур для публикации выбранных пользователем данных в соответствующем пользовательском облачном хранилище.

Создание подобной процедуры стало возможным при использовании технологии веб-приложений, позволяющей запросить у пользователя разрешение на доступ к определённым возможностям пользовательского аккаунта различных поставщиков облачных сервисов.

Такая технология поддерживается Microsoft, Google, Yandex, ESRI и др. Перед использованием соответствующего сервиса пользователю предлагается загрузить данные для анализа в его персональное хранилище. Для этого пользователь проходит авторизацию на сайте поставщика сервиса, после чего приложение запрашивает у него разрешение на скачивание и публикацию данных в его хранилище. При выборе облачного сервиса другого поставщика пользователь имеет возможность перемещения данных для обработки в хранилище этого поставщика.

Таким образом, нами предложены подход и технологическое решение для организации единого пространства данных для различных поставщиков облачных сервисов [7] (рис. 1).

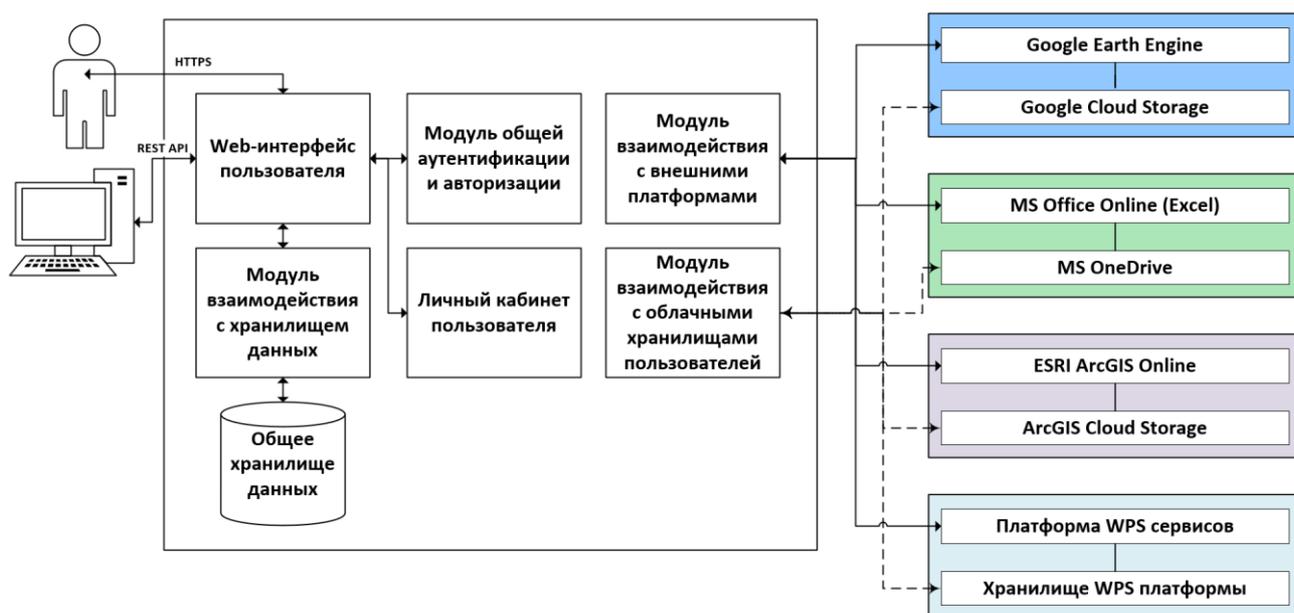


Рисунок 1. Функциональная схема вычислительно-аналитической среды

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ

Для обеспечения более универсального подхода к обеспечению взаимодействия между различными инструментами анализа данных мы предлагаем использовать подход на основе создания общей шины платформ (рис. 2).

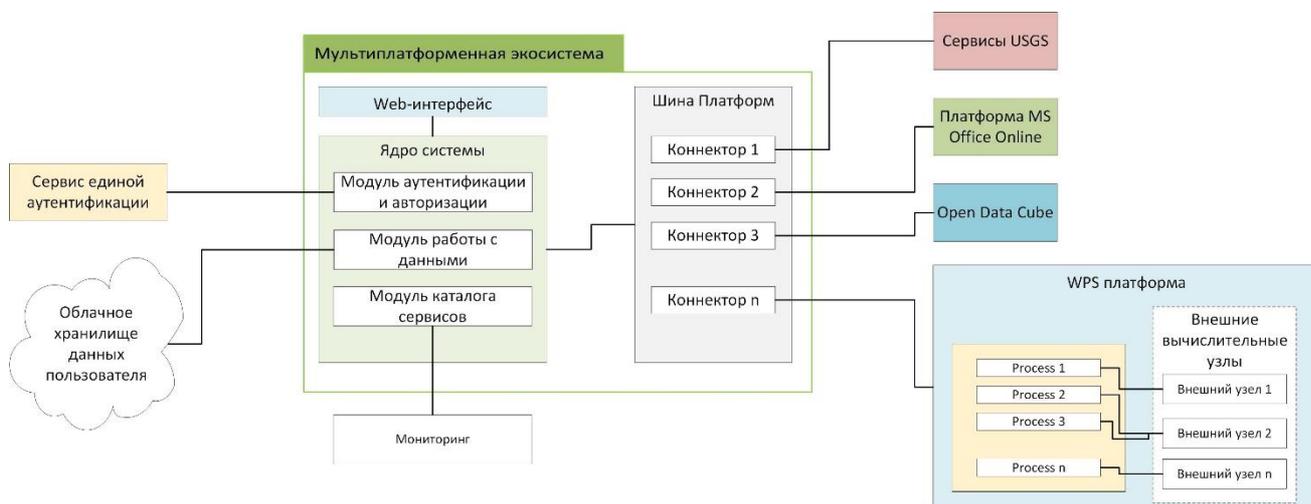


Рисунок 2. Схема предварительного проектирования системы

Такой подход подразумевает создание специализированных коннекторов для обеспечения взаимодействия с конкретным инструментом анализа данных. При этом все используемые данные, включая результаты обработки, передаются

между инструментами анализа через общую шину данных, как это реализуется в текущей версии системы.

Работы выполняются в рамках Государственного задания ГГМ РАН по Теме № 0140-2019-0005 «Разработка информационной среды интеграции данных естественнонаучных музеев и сервисов их обработки для наук о Земле», а также Государственной темы № 1021061009468-8-1.5.1 «Цифровая платформа интеграции и анализа геологических и музейных данных»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eremenko V. S., Naumova V. V., Platonov K. A., Dyakov S. E., Eremenko A. S. The main components of a distributed computational and analytical environment for the scientific study of geological systems // Russian Journal of Earth Sciences. 2018. Vol. 18, Issue 6.

2. Moser L., Thuraisingham B., Zhang J. Services in the cloud // IEEE transactions on services computing. 2015. Vol. 8, No. 2.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-41267-2_63

3. Федотов А.М., Барахнин В.Б., Гуськов А.Е., Молородов Ю.И. Распределенная информационно-аналитическая среда для исследований экологических систем // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11. Спец. вып. С. 113–125.

4. Gordov E.P., Krupchatnikov V.N., Okladnikov I.G., and Fazliev A.Z. Thematic virtual research environment for analysis, evaluation and prediction of global climate change impacts on the regional environment // Proc. SPIE 10035, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 100356J (29 November 2016); <http://doi.org/10.1117/12.2249118>

5. Candela L., Castelli D., and Pagano P., 2013. Virtual Research Environments: An Overview and a Research Agenda. Data Science Journal. 2013. Vol. 12. P. GRDI75–GRDI81. <http://doi.org/10.2481/dsj.GRDI-013>

6. Бычков И.В., Ружников Г.М., Фёдоров Р.К., Шумилов А.С. Компоненты среды WPS-сервисов обработки геоданных // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2014. Т. 12, Выпуск 3. С. 16–24.

7. Eremenko V.S., Naumova V.V. A multi-platform ecosystem for computing in Earth sciences // CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 3006. P. 67–73. <http://doi.org/10.25743/SDM.2021.70.81.010>

CREATING A DATA PROCESSING ECOSYSTEM FOR GEOLOGICAL RESEARCH

Vitaliy Eremenko¹[0000-0002-5250-5743], Vera Naumova²[0000-0002-3001-1638]

Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow

¹ vitaer@gmail.com, ² naumova_new@mail.ru

Abstract

This paper discusses heterogeneous geographically distributed computing systems for processing geological data and approaches to organizing interaction with these systems. The systems are classified by the authors into a number of groups based on the main functional capabilities and technological solutions. A description of the main properties for each type of systems is given, including possible ways for interaction.

An approach is proposed for organizing a single workspace with access to heterogeneous geographically distributed computing systems within the ecosystem developed by the authors. The architecture of the proposed solution and the rules of interaction for its participants are described. A software prototype is demonstrated that implements the described principles on the example of several heterogeneous systems for processing geological information.

Keywords: *computing and analytical environment, cloud services, web services, software platforms*

REFERENCES

1. Eremenko V. S., Naumova V. V., Platonov K. A., Dyakov S. E., Eremenko A. S. *The main components of a distributed computational and analytical environment for the scientific study of geological systems // Russian Journal of Earth Sciences. 2018. Vol. 18, Issue 6.*

2. Moser L., Thuraishingham B., Zhang J. *Services in the cloud // IEEE transactions on services computing. 2015. Vol. 8, No. 2.*

https://doi.org/10.1007/978-3-319-41267-2_633. Fedotov A.M., Barahnin V.B., Gus'kov A.E., Molorodov Yu.I. *Raspredelennaya informacionno-analiticheskaya sreda*

dlya issledovaniy ekologicheskikh sistem // Vychislitel'nye tekhnologii. 2006. T. 11. Spec. vyp. S. 113–125.

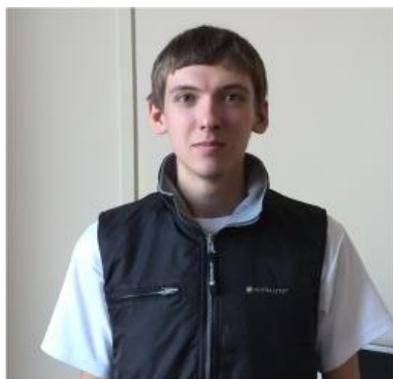
4. *Gordov E.P., Krupchatnikov V.N., Okladnikov I.G., and Fazliev A.Z.* Thematic virtual research environment for analysis, evaluation and prediction of global climate change impacts on the regional environment // Proc. SPIE 10035, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 100356J (29 November 2016); <http://doi.org/10.1117/12.2249118>

5. *Candela L., Castelli D., and Pagano P.* Virtual Research Environments: An Overview and a Research Agenda. Data Science Journal. 2013. Vol. 12. P. GRDI75–GRDI81. <http://doi.org/10.2481/dsj.GRDI-013>

6. *Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fyodorov R.K., Shumilov A.S.* Komponenty sredy WPS-servisov obrabotki geodannyh // Vestnik NGU. Seriya: Informacionnye tekhnologii. 2014. T. 12, Vypusk 3. S. 16–24.

7. *Eremenko V.S., Naumova V.V.* A multi-platform ecosystem for computing in Earth sciences // CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 3006. P. 67–73. <http://doi.org/10.25743/SDM.2021.70.81.010>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



ЕРЁМЕНКО Виталий Сергеевич – младший научный сотрудник, Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия.

Vitaliy EREMENKO – Junior researcher of SGM scientific department, Vernadsky State Geological Museum RAS, Moscow (Russia).

email: vitaer@gmail.com,

ORCID: 0000-0002-5250-5743



НАУМОВА Вера Викторовна – д. г.-м. н., г. н. с., зав. Научным отделом Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН, Москва.

Vera NAUMOVA – Prof., head of SGM scientific department, Vernadsky State Geological Museum RAS, Moscow (Russia).

Email: naumova_new@mail.ru,

ORCID: 0000-0002-3001-1638

Материал поступил в редакцию 31 августа 2022 года

УДК 004.550

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ
И ПРОВЕДЕНИИ VI ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НАУК О ЗЕМЛЕ
И ЦИФРОВИЗАЦИЯ В ГЕОЛОГИИ И ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ITES-2022»**

В. В. Наумова^{1, [0000-0002-3001-1638]}, **В.С. Ерёменко**^{2, [0000-0002-5250-5743]},
А.С. Еременко^{3, [0000-0003-1923-8417]}

^{1, 2, 3} Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва

³ Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

¹ naumova_new@mail.ru, ² vitaer@gmail.com, ³ academy21@gmail.com

Аннотация

Описано применение информационных технологий и современных средств цифровизации при организации и проведении Конференции по ИТ в науках о Земле, а также представлены современные аспекты визуализации, использованные в докладах участников Конференции.

Ключевые слова: Информационные технологии, цифровизация, цифровые двойники, Науки о Земле

ВВЕДЕНИЕ

VI Всероссийская конференция «Информационные технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности. ITES-2022» завершилась в Дальневосточном федеральном университете г. Владивостока.

Организаторы Конференции: Отделение наук о Земле РАН, Академия горных наук, Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Дальневосточный федеральный университет (Институт математики и компьютерных технологий).

Конференция проведена при финансовой поддержке Гранта Государственной Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030». Партнер Конференции – ГК СканЭкс.

Ранее конференции «Современные информационные технологии в науках о Земле. ITES» проводились в городах Магадане (2008), Владивостоке (2010), Петропавловске-Камчатском (2014), Южно-Сахалинске (2016) и Москве (2019) [1–5].

Цель данной конференции состоит в том, чтобы привлечь ведущих исследователей и экспертов в информационных технологиях, прикладной математике, геоинформатике, геофизике, системном анализе, а также науках о Земле для обмена знаниями и опытом и обсуждения возможностей подготовки совместных проектов и программ.

Задачи конференции покрывают весь спектр вопросов, связанных с поиском и разведкой месторождений полезных ископаемых, рациональным природопользованием; сбором, обработкой, анализом данных; управлением и популяризацией знаний, а также применением информационных технологий в области металлогении критических полезных ископаемых; социальных аспектов горно-геологической отрасли; прогнозных построений в области геологической разведки и землепользования.

Организаторы предполагают, что конференция способствовала повышению эффективности использования результатов научной деятельности органами исполнительной власти и организациями, связанными с контролем и управлением природными ресурсами, предупреждением и ликвидацией последствий чрезвычайных природных и антропогенных ситуаций, проектно-изыскательскими работами.

Организаторы надеются, что эта конференция послужит стимулом для развития информационных технологий в научных исследованиях и образовании на Дальнем Востоке РФ и будут способствовать привлечению молодежи в науку.

Более чем 100 специалистов из институтов Российской академии наук и университетов РФ, 15 городов РФ: Москвы, Санкт-Петербурга, Новосибирска, Томска, Иркутска, Красноярска, Магадана, Петропавловска-Камчатского, Южно-Сахалинска, Махачкалы, Тюмени, Апатитов, Волгограда, Кемерово, Владивостока и др. приняли участие в этой Конференции.

На открытии Конференции выступили: сопредседатели Программного комитета Конференции: Черкасов С.В., д. т. н., директор Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва; Алексанин Г.А., директор Института математики и компьютерных технологий ДВФУ, г. Владивосток и зам. председателя Программного комитета Наумова В.В., д. г.-м. н., зав. Научным отделом Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва.

Доклады, представленные на Конференции, описывают результаты последних лет в следующих областях: открытый доступ к научным данным и алгоритмам обработки в области наук о Земле; особенности данных (в том числе и Big Data) в науках о Земле: новые концепции и методы, инструменты их сбора, интеграции и обработки в различных информационных системах, в том числе в системах с интенсивным использованием данных; цифровые пространства геологических знаний; информационно-вычислительные геологические компьютерные системы; платформы обработки геологических данных; интеллектуальный анализ данных, извлечение фактов и знаний из научных публикаций; тезаурусы, онтологии, концептуальное моделирование, семантический веб, связанные данные, сервисы, семантическое структурирование контента, применение в науках о Земле; управление развитием территорий освоения природных ресурсов на основе технологий и данных дистанционного зондирования Земли; технологии виртуальной и дополненной реальностей для создания систем демонстрации и популяризации достижений в науках о Земле; цифровая трансформация в геологии и горнодобывающей промышленности и цифровые двойники и др.

На пленарной и научных сессиях доклады прошли в 2-х режимах: очном и удаленном.

Доклады, представленные на Конференции, отметили следующие важные факты.

- Имеется соответствие мировым научным тенденциям научных исследований в РФ по ряду рассмотренных направлений.
- В настоящее время в РФ созданы и разрабатываются различные сети удаленного мониторинга природных объектов и процессов, в том числе в Арктической зоне РФ, а также организуются оперативные службы сбора данных. При этом продуцируется огромное количество новых больших данных, для которых необходимо организовывать современные системы хранения и анализа.
- Применение данных дистанционного зондирования в науках о Земле относится к наиболее бурно развивающемуся направлению. Объем информации, получаемой со спутников, растет, и на сегодняшний день остро стоит проблема обработки и управления большими массивами данных. Интеграция территориально распределенных спутниковых данных, предоставление к ним онлайн доступа и организация онлайн сервисов их тематического анализа являются насущными задачами.
- Внедрение методов искусственного интеллекта и управление данными для получения знаний в области наук о Земле – это движение вперед к цифровой научной среде будущего.
- Явно недостаточна обеспеченность данного направления научными кадрами. Во всех институтах РАН, относящихся к Отделению наук о Земле, работают лишь маленькие лаборатории и группы этого направления.

Краткие материалы Конференции представлены в книге «Информационные технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности. ITES-2022: материалы VI Всероссийской конференции, Владивосток, 3–8 октября 2022 г.» [6].

В настоящем тематическом выпуске журнала «Электронные библиотеки» представлены избранные доклады Конференции, соответствующие профилю журнала и представленные Программным комитетом для публикации.

Оргкомитет разработал и провел для участников Конференции обширную экскурсионную программу, в которую вошли: автобусно-пешеходная экскурсия по Владивостоку, экскурсия в Приморский океанариум, морская прогулка с рыбалкой в заливе Босфор Восточный.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Направленность тем Конференции стимулировала ее организаторов на широкое использование информационных технологий и современных методов цифровизации при ее организации и проведении.



Рисунок 1. Видео ролик, посвященный Конференциям ITES

Сайт Конференции: <http://ites2022.sgm.ru>

Заседания Конференции проведены в гибридном режиме с использованием программного обеспечения видеоконференцсвязи Microsoft Teams. Это позволило Конференции успешно работать независимо от территориальной распределенности ее участников.

Материалы опубликованы на сайте Конференции после ее окончания (http://ites2022.sgm.ru/images/ites/Abstracts_ITES-2022_ISBN.pdf). Книга включает краткие тезисы докладов участников на двух языках, а также сопровождается авторским указателем и указателем организаций.

Фотогалерея Конференции (<http://photo.sgm.ru>) реализована на скрипте Piwigo – системы управления контентом (CMS) для создания сайта-фотогалереи, которая обладает мощными функциями публикаций и управления коллекциями

изображений. Она дает возможность публикации изображений не только членам Оргкомитета, но и всем ее Участникам. Это позволяет видеть Конференцию разными глазами. Подобное интерактивное взаимодействие с участниками представляется нам достаточно интересным.

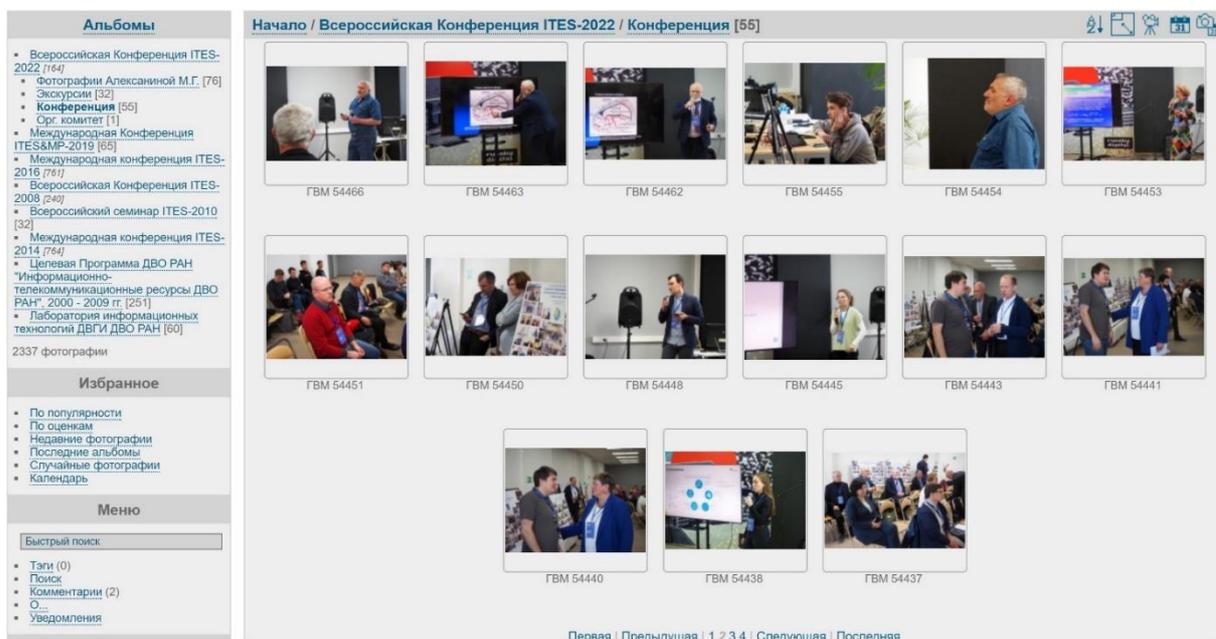


Рисунок 2. Фотогалерея Конференции

Видео докладов Конференции опубликованы на Видео-портале Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН (<http://video.sgm.ru/node/138>).

Научная сессия



Наумова Вера Викторовна, Государственный геологический музей им. В.И.Вернадского РАН, г. Москва
Единое цифровое пространство геологических научных знаний

Разработка цифровой экосистемы по анализу геологических данных

Ерёменко Виталий Сергеевич, Государственный геологический музей им. В.И.Вернадского РАН, г. Москва
Разработка цифровой экосистемы по анализу геологических данных



Загумёнов Алексей Андреевич, Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва
Разработка вычислительно-аналитического узла по обработке спутниковых данных

Рисунок 3. Видео докладов Конференции

Отметим, что визуализация результатов научных исследований участников Конференции в ряде докладов проводилась с использованием информационных технологий и современных средств цифровизации. Некоторые из примеров таких докладов представлены на рисунках 4 и 5.

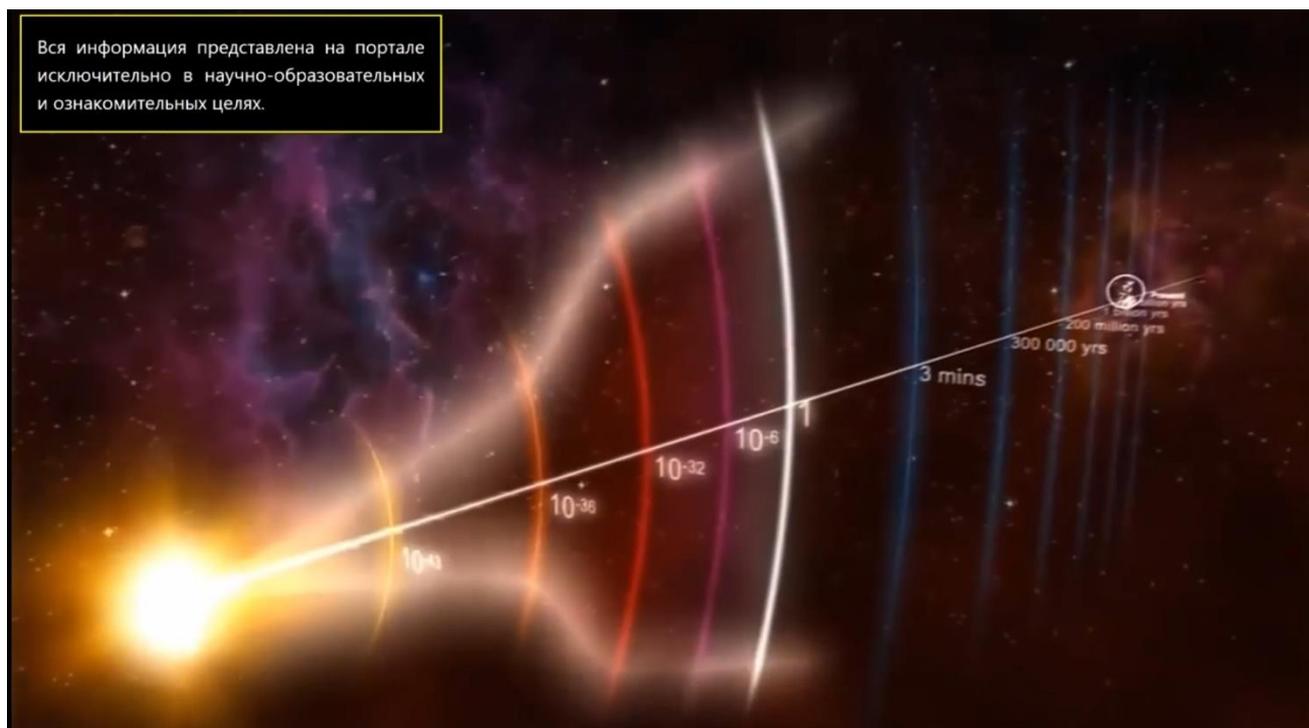


Рисунок 4. Фрагмент доклада Еременко А.С., Лещиковой Д.Е., Романенковой Л.С. (Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва; Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток; Дальневосточный федеральный университет, Владивосток) «Научно-популярный портал «История Земли»: текущее состояние и перспективы развития»



Рисунок 5. Фрагмент доклада Молородова Ю. И. и Слепцова Е.А. (Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий

СО РАН, г. Новосибирск) «Использование технологий смешанной реальности для общения с природными объектами»

Конференция проведена в рамках Государственного задания ГМ РАН по Теме № 1021061009468-8-1.5.1 «Цифровая платформа интеграции и анализа геологических и музейных данных».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Наумова В.В., Голубенко И.С.* Всероссийская конференция «Современные информационные технологии для научных исследований» // Открытое образование. 2008. №4 (069). С. 4–6.
2. *Наумова В.В., Голубенко И.С.* Международная конференция «Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле» ITES-2014 // Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле. 2015, №1, выпуск 25. С. 56–59.
3. *Наумова В.В.* IV Международная Конференция «Современные информационные технологии для научных исследований в области наук о Земле. ITES-2016» // Вестник ДВО РАН. 2016. № 5. С. 164–167.
4. *Наумова В.В.* О конференциях ITES «Современные информационные технологии для научных исследований в области наук о Земле» на Дальнем Востоке России // Электронные библиотеки. 2017. Т. 20. № 1. С. 1–29.
5. *Наумова В.В.* V Международная конференция «Информационные технологии для наук о Земле и приложения для геологии, горной промышленности и экономики. ITES&MP-2019» // Электронные библиотеки. 2020. Т. 23. №6. С. 1279–1300.
6. Информационные технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности. ITES-2022: материалы VI Всероссийской конференции, Владивосток, 3–8 октября 2022 г. // сост. А.С. Еременко. Владивосток: Издательство Дальневосточного федерального университета, 2022. 74 с. <https://doi.org/10.24866/7444-5341-1>

THE USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND MODERN MEANS OF DIGITALIZATION IN THE ORGANIZATION AND CONDUCT OF VI ALL-RUSSIAN CONFERENCE “INFORMATION TECHNOLOGIES FOR EARTH SCIENCES AND DIGITALIZATION IN GEOLOGY AND MINING INDUSTRY. ITES-2022”

Vera Naumova¹, [0000-0002-3001-1638], Vitaliy Eremenko², [0000-0002-5250-5743],
Alexander Eremenko³, [0000-0003-1923-8417]

^{1,2,3} Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow

³ Institute of automatic and control processes of FEB RAS, Vladivostok

¹ naumova_new@mail.ru, ² vitaer@gmail.com, ³ academy21@gmail.com

Abstract

The article describes the use of information technologies and modern means of digitalization in organizing and holding a Conference on IT in Earth Sciences. Modern aspects of visualization are also described in the reports of the Conference participants.

Keywords: *Information technology, digitalization, digital doubles. Earth sciences*

REFERENCES

1. Naumova V.V., Golubenko I.S. Vserossijskaya konferenciya «Sovremennye informacionnye tekhnologii dlya nauchnyh issledovanij» // Otkrytoe obrazovanie. 2008. №4 (069). S. 4–6.
2. Naumova V.V., Golubenko I.S. Mezhdunarodnaya konferenciya «Sovremennye informacionnye tekhnologii dlya fundamental'nyh nauchnyh issledovanij v oblasti nauk o Zemle» ITES-2014 // Vestnik KRAUNC, Nauki o Zemle. 2015, №1, vypusk 25. S. 56–59.
3. Naumova V.V. IV Mezhdunarodnaya Konferenciya «Sovremennye informacionnye tekhnologii dlya nauchnyh issledovanij v oblasti nauk o Zemle. ITES-2016» // Vestnik DVO RAN. 2016. № 5. S. 164–167.
4. Naumova V.V. O konferenciyah ITES «Sovremennye informacionnye tekhnologii dlya nauchnyh issledovanij v oblasti nauk o Zemle» na Dal'nem Vostoke Rossii // Elektronnye biblioteki. 2017. T. 20. № 1. S. 1–29.

5. *Naumova V.V.* V Mezhdunarodnaya konferenciya «Informacionnye tekhnologii dlya nauk o Zemle i prilozheniya dlya geologii, gornoj promyshlennosti i ekonomiki. ITES&MP-2019» // Elektronnye biblioteki. 2020. T. 23. №6. S. 1279–1300.

6. Informacionnye tekhnologii dlya nauk o Zemle i cifrovizaciya v geologii i gornodobyvayushchej promyshlennosti. ITES-2022: materialy VI Vserossijskoj konferencii, Vladivostok, 3–8 oktyabrya 2022 g. // sost. A.S. Eremenko. Vladivostok: Izdatel'stvo Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta, 2022. 74 s. <https://doi.org/10.24866/7444-5341-1>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

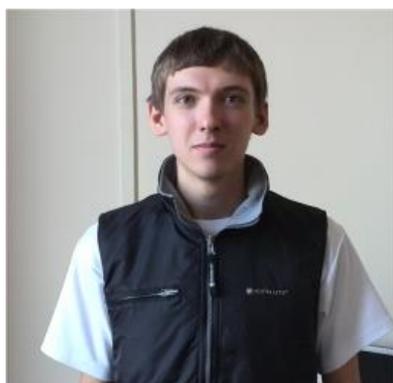


НАУМОВА Вера Викторовна – д. г.-м. н., г. н. с., зав. Научным отделом Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН, Москва.

Vera NAUMOVA – Prof., head of SGM scientific department, Vernadsky State Geological Museum RAS, Moscow (Russia).

Email: naumova_new@mail.ru,

ORCID: 0000-0002-3001-1638



ЕРЁМЕНКО Виталий Сергеевич – младший научный сотрудник, Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия.

Vitaliy EREMENKO – Junior researcher of SGM scientific department, Vernadsky State Geological Museum RAS, Moscow (Russia).

email: vitaer@gmail.com,

ORCID: 0000-0002-5250-5743



ЕРЕМЕНКО Александр Сергеевич – программист (внештатный сотрудник), Государственный Геологический музей им. В.И. Вернадского РАН; старший научный сотрудник, кандидат технических наук, Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия.

Alexander EREMENKO – contract programmer of SGM scientific department, Vernadsky State Geological Museum RAS, Moscow (Russia); Ph.D, Senior researcher of Institute of automatic and control processes of FEB RAS, Vladivostok (Russia).

email: academy21@gmail.com,

ORCID: 0000-0003-1923-8417

Материал поступил в редакцию 10 ноября 2022 года

УДК 551.24, 550.34

СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ЮЖНОЙ ОКОНЕЧНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО СИХОТЭ-АЛИНСКОГО РАЗЛОМА ПО ДАННЫМ ГНСС-НАБЛЮДЕНИЙ

А. А. Салахутдинова¹, [0000-0003-4760-8980], Н. В. Шестаков^{1,2}, [0000-0003-3901-9684],

Е. А. Лялюшко¹, [0000-0002-9081-6323], Н. А. Гагарский¹, [0000-0001-7305-1376]

¹Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ, Россия)

²Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМ ДВО РАН, Россия)

Аннотация

Центральный Сихотэ-Алинский разлом (ЦСАР) является одной из крупнейших тектонических структур континентальной части юга Дальнего Востока России. Его современная геодинамическая активность всё ещё остается очень малоизученной, особенно, методами дистанционного зондирования. Имеющиеся геологические оценки движений по ЦСАР достигают нескольких мм/год, однако существующие разрозненные современные геодезические данные позволяют утверждать, что смещений, превышающих первые мм/год в центральной части разлома, не выявлено.

В настоящей работе по данным ГНСС-наблюдений, выполненных в первые две декады XXI века, получены первые количественные оценки вековых (плитных) движений земной коры в окрестностях п. Киевка (Приморский край), расположенного в южной оконечности ЦСАР. Также в районе исследований оценено и выполнено численное моделирование влияния возмущений геосреды (ко- и постсейсмические смещения), инициированных катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 года, Mw 9.1. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с имеющимися моделями очага землетрясения и моделями постсейсмической вязкоупругой релаксации геосреды.

Ключевые слова: ГНСС-измерения, косейсмические и постсейсмические смещения, землетрясение Тохоку 11.03.2011, Дальний Восток России.

ВВЕДЕНИЕ

Современные движения земной коры (СДЗК) юга Дальнего Востока России, включая Приморский край, до сих пор изучены недостаточно, что связано с малонаселенностью и труднодоступностью большей части изучаемой территории. Практически единственным методом выполнения подобных исследований в Приморье является использование Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Первые значения среднегодовых скоростей СДЗК в этом регионе и сопредельных с ним территориях были получены в работе [1] по данным непрерывных и периодических ГНСС-измерений. Согласно полученным результатам, Приморский край находится в пределах Евроазиатской литосферной плиты. Скорости геодезических пунктов относительно этой плиты малы и не превосходят 5 мм/год. Вопрос о принадлежности региона к предполагаемой Амурской микроплите [2, 7], так же, как и вопрос о самом ее существовании, до сих пор остается открытым, поскольку имеющихся ГНСС-наблюдений пока недостаточно для его разрешения. Дополнительные данные о вековых скоростях земной коры Приморского края получены на профиле, пересекающем крупнейшую тектоническую структуру региона – Центральный Сихотэ-Алинский разлом (ЦСАР), в работах коллег из ИНГГ СО РАН (см., например, [6]). Тем не менее, современная геодинамическая активность ЦСАР остается практически неизученной, особенно, методами дистанционного зондирования.

В настоящей работе по данным ГНСС-наблюдений, выполненных в первые две декады XXI века, получены первые количественные оценки вековых (плитных) движений земной коры в окрестностях южной оконечности ЦСАР. Также в районе исследований оценено и выполнено численное моделирование влияния возмущений геосреды (косейсмические смещения), инициированных катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 года, Mw 9.1.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Для изучения современных движений земной коры в южной части ЦСАР нами используются кратковременные периодические ГНСС-наблюдения на

пункте высокоточной геодезической сети «Киевка» (KIEV), расположенном в 12 километрах от п. Киевка, и непрерывные спутниковые измерения на пункте «Заповедное» (ZAPV), расположенном в п. Заповедное (рис. 1).

С 2015 года на пункте KIEV нами ежегодно в течение трёх последовательных дней проводятся 8-часовые сеансы ГНСС-наблюдений при помощи одного и того же комплекта спутниковой аппаратуры. Начало и окончание сессий соответствуют 00:00 и 08:00 UTC. Для жесткой фиксации положения ГНСС-антенны используется специальная латунная проставка высотой 148 мм, нижний конец которой ввинчивается в отверстие в специальной металлической пластине, замурованной в верхнюю часть геодезического центра, а верхний – в антенну (рис. 2а). Для производства измерений используется двухчастотный мультисистемный GPS/ГЛОНАСС приёмник геодезического класса Topcon GB1000 с антенной Topcon PG_A1 (рис. 2а).

В рамках программы развития геодезической сети Российской Федерации АО «ПриморАГП» в 2003, 2008 и 2014 годах на пункте KIEV выполнены кратковременные ГНСС-наблюдения продолжительностью до нескольких суток разнотипной спутниковой аппаратурой геодезического класса (в основном производства компании Leica), которые также использованы в данной работе.

Специально для проведения непрерывных геодинамических ГНСС-наблюдений в 2015 году в п. Заповедное нами был заложен пункт ZAPV, расположенный на берегу Японского моря в 20 км к югу от пункта ВГС KIEV. С этого же года на нём проводятся непрерывные спутниковые наблюдения при помощи ГНСС-приёмника Trimble NetR9, оснащённого антенной Trimble Zephyr Geodetic 2 с пластиковым полусферическим обтекателем (рис. 2б и 2в). Данные наблюдений в автоматизированном режиме через сеть сотовой связи передаются в информационную систему «Сигнал», созданную и функционирующую на базе Вычислительного центра ДВО РАН [5]. Данные ГНСС-наблюдений хранятся в бинарном формате производителя спутникового оборудования и международном текстовом обменном формате RINEX.

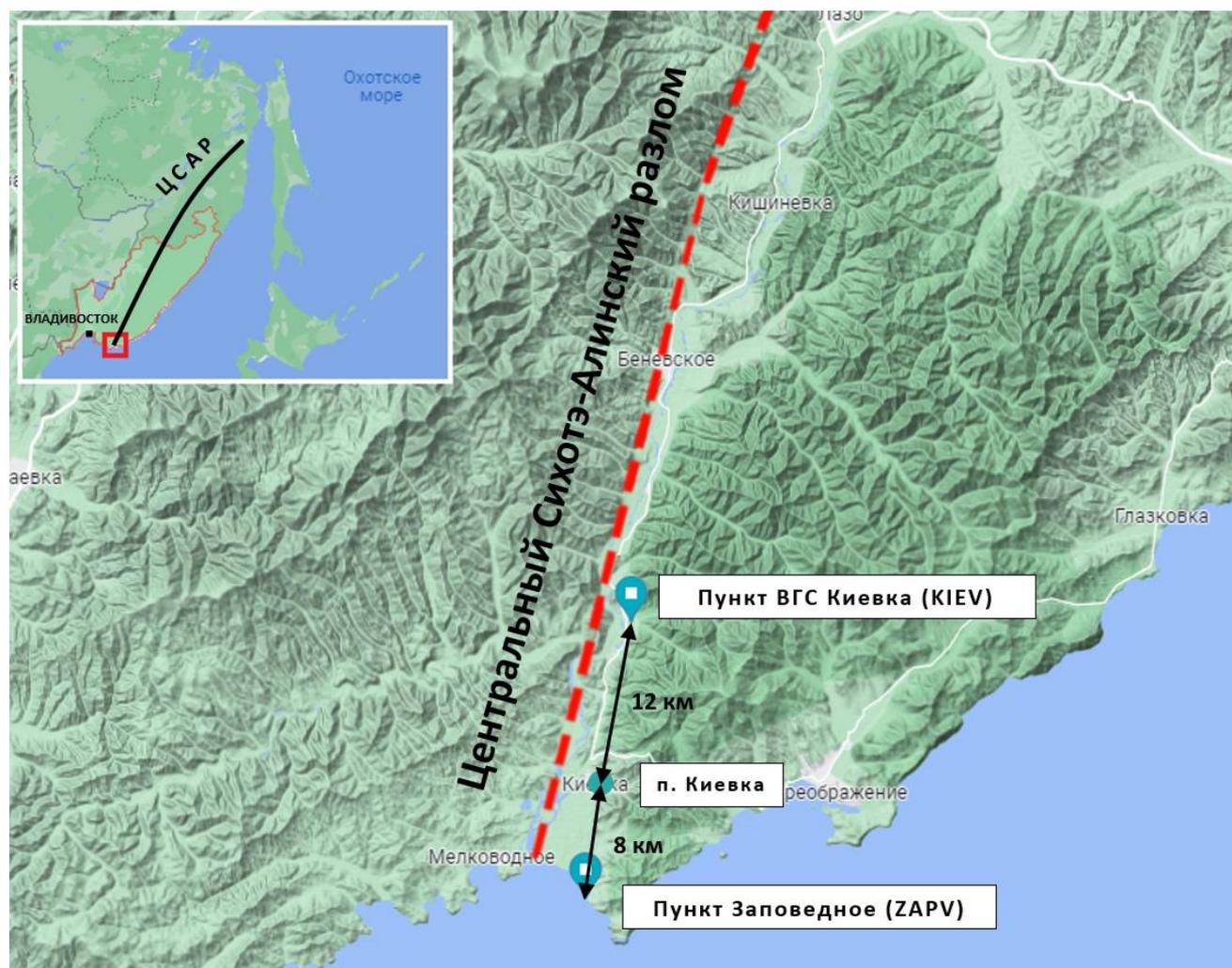


Рисунок 1. Схема расположения пунктов ГНСС-наблюдений. На врезке общее – положение района исследований и ось Центрального Сихотэ-Алинского разлома (ЦСАР).

ОБРАБОТКА ГНСС-ДАНЫХ

Обработка данных ГНСС-наблюдений производилась в программном пакете RTKLIV (<https://rtklib.com/>) в режиме PPP-Static (высокоточное точечное позиционирование) в глобальной геоцентрической системе координат ITRF2014 без формирования базовых линий [4]. Также использовались: файлы бортовых эфемерид системы GPS, поправки часов спутников GPS и ГЛОНАСС и файлы точных эфемерид, формируемые европейским центром CODE (<ftp://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>). Координаты пунктов вычисляются в геоцентрической системе координат $(X, Y, Z)^T$. Для удобства дальнейших расчётов их разности

относительно начальной эпохи наблюдений преобразуются в локальную топоцентрическую систему координат $(dN, dE, dU)^T$, начало которой находится на поверхности Земли в точке наблюдения.



Рисунок 2. Общий вид пунктов наблюдений: а – периодически наблюдаемый пункт ВГС KIEV; б, в – постоянно действующая станция ZAPV. На рис. б показаны ГНСС-приемник и микрокомпьютер для хранения и передачи данных аналитический центр, на рис. в приведен вид геодезического центра и принимающей ГНСС-антенны.

По полученным значениям были построены временные серии изменения пространственного положения пунктов наблюдений в трёх взаимно-перпендикулярных направлениях: север–юг (dN), восток–запад (dE), зенит–надир (dU) (рис. 3). Измерения по высотной компоненте на пункте KIEV за 2003 и 2008 годы были исключены из дальнейших расчётов, так как отсутствуют сведения о корректных высотах антенн в эти эпохи наблюдений.

УЧЁТ ВЛИЯНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ТОХОКУ НА ПОЛОЖЕНИЕ ПУНКТА KIEV

Произошедшее 11 марта 2011 года у восточного побережья Японии катастрофическое землетрясение Тохоку, Mw 9.1, вызвало значимые косейсмические смещения земной коры Приморского края [1]. Для оценки косейсмического смещения на пункте KIEV временные серии его среднесуточных координатных положений по каждой компоненте были разделены на 2 части: до и после 70-го дня 2011 года (дата землетрясения). Однако из-за отсутствия ГНСС-наблюдений в 2011 году данные экстраполировались на дату землетрясения отдельно для каждого фрагмента ряда (рис. 3). Для этого данные каждого фрагмента ряда аппроксимировались линейной регрессией. Её коэффициенты и их среднеквадратические ошибки определялись методом наименьших квадратов. Соответствующие уравнения регрессионных прямых приведены на рис. 3. Результаты экстраполяции подвержены значительному влиянию постсейсмических движений земной коры, которые имели высокую интенсивность в первые 0,5 года после главного толчка [1] и поэтому оказались существенно завышены. Полученные оценки косейсмических смещений равны $-54,1$ мм и $54,7$ мм по N и E компоненте, соответственно. Механизм этого явления ясен из рис. 4а, на котором показан ряд непрерывных ГНСС-измерений на пункте NKHD (г. Находка). Для расчёта поправки в результаты наших определений использован полный ряд наблюдений NKHD (рис. 4б и 4в).

Для вычисления поправок в плановые компоненты dN' и dE' ряд наблюдений пункта NKHD раздельно (до и после землетрясения Тохоку) аппроксимировался линейной регрессией. С их помощью были получены значения координат пункта до и после косейсмического смещения и вычислены соответствующие поправки (см. рис. 4б и 4в). В силу относительной близости пункта NKHD к станции KIEV значения поправок для них приняты одинаковыми. Скорректированные оценки косейсмических смещений на пункте KIEV равны $-28,9$ и $22,2$ мм по N и E компоненте, соответственно. Значения, теоретически вычисленные при помощи модели очага землетрясения [3], получились равными $-23,2$ и $41,6$ мм соответственно, что дает удовлетворительное согласие с наблюдениями по северной компоненте и существенно завышенное значение по восточной компоненте. По-

лученные несоответствия могут быть объяснены как неточностью расчета поправки, так и неточностями вычисления косейсмических смещений на основе модели очага землетрясения. Смещение по компоненте dU практически равно нулю.

Оценки косейсмических подвижек были получены только для пункта KIEV, так как на пункте ZAPV наблюдения начались с 2015 года.

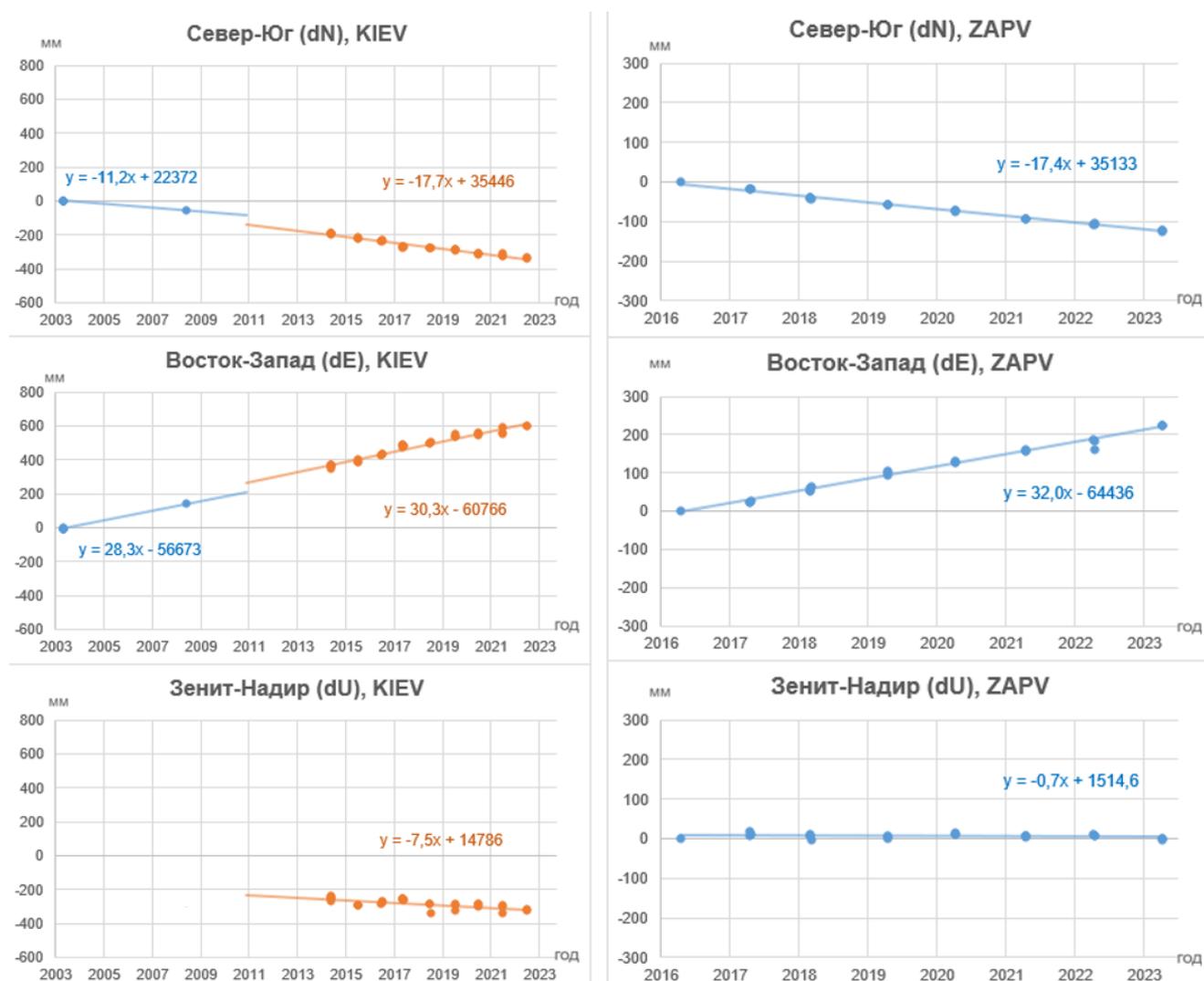


Рисунок 3. Временные серии изменения пространственного положения пунктов ГНСС-наблюдений KIEV и ZAPV. Оранжевым цветом на пункте KIEV показан ряд после землетрясения Тохоку 11.03.2022г.

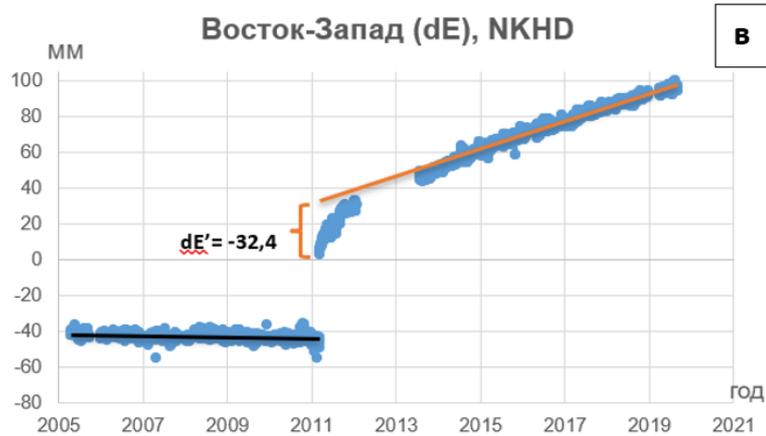
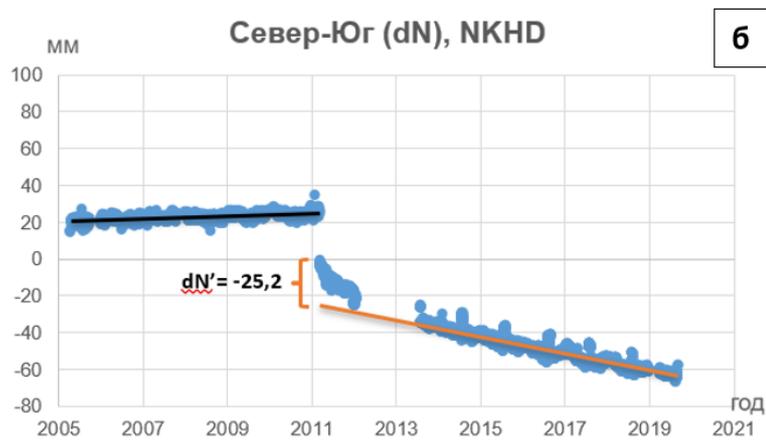
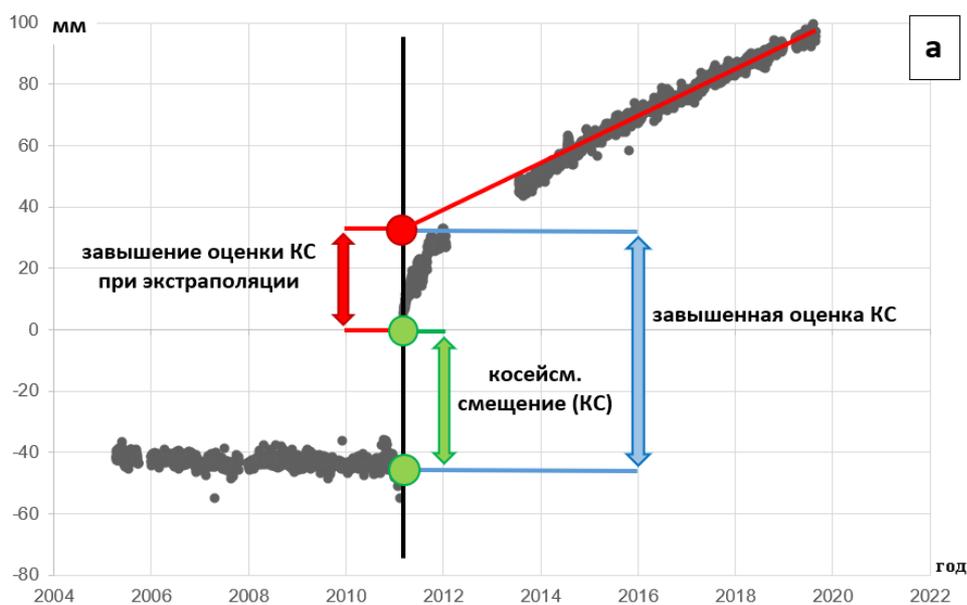


Рисунок 4. Методика вычисления поправок в плановые компоненты косейсмического смещения (рис. 4а). На рис. 4б и 4в показаны величины и схема вычисления поправок за постсейсмические движения на пункте НКНД (г. Находка).

СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПУНКТОВ

После обработки ГНСС-данных на пунктах наблюдений и формирования временных серий изменения их пространственных положений, были получены скорости перемещения каждого пункта относительно друг друга и Евроазиатской литосферной плиты.

На основании графиков смещения координат пунктов KIEV и ZAPV (рис. 3), а также с учётом косейсмического смещения были получены скорости перемещения пунктов в системе координат ITRF2014, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Скорости перемещения пунктов в системе координат ITRF2014.

Пункт	Период наблюдений	Скорость, мм/год		
		dN	dE	dU
ZAPV	2015–2022 гг.	$-17,4 \pm 0,2$	$32,0 \pm 0,7$	$-0,7 \pm 0,6$
KIEV	2003–2008 гг.	$-11,2 \pm 0,3$	$28,3 \pm 0,7$	-
	2014–2022 гг.	$-17,7 \pm 0,6$	$30,3 \pm 1,0$	$-7,5 \pm 1,4$

Из таблицы видно, что до землетрясения вековая скорость пункта KIEV составляла 30,4 мм/год, а после землетрясения станция ZAPV перемещается к юго-востоку со скоростью 36,4 мм в год, в то время как пункт KIEV движется сонаправленно со скоростью 35,1 мм в год. Столь высокие скорости перемещения после землетрясения, очевидно, обусловлены продолжающимися постсейсмическими процессами.

Основываясь на полученных выше компонентах скоростей перемещений каждого пункта, становится возможным вычислить взаимные перемещения в топоцентрической системе координат по формуле

$$V_{\text{отн}} = V_{\text{KIEV}} - V_{\text{ZAPV}}.$$

По этой формуле были получены скорости перемещения пункта KIEV после 2011 года относительно пункта ZAPV, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2. Таблица скоростей перемещения пункта KIEV относительно пункта ZAPV.

	Относительная скорость, мм/год
V_{dN}	$-0,3 \pm 0,3$
V_{dE}	$-1,6 \pm 1,3$
V_{dU}	$-6,7 \pm 1,5$

Для расчета скорости перемещения пунктов относительно Евразийской литосферной плиты мы использовали модель её «жесткого» вращения ITRF2014 [8]. Сначала было вычислено модельное движение плиты в данном регионе, которое составило $-13,2$ и $24,3$ мм/год по северной и восточной компонентам соответственно. Движение пунктов относительно Евразийской литосферной плиты находилось как разности между вычисленными по результатам обработки ГНСС-наблюдений и модельными значениями скоростей. Результаты расчётов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Движение пунктов относительно Евразийской литосферной плиты.

	Полученная скорость			Модельное значение (ITRF2014)	Движение пунктов относительно Евразийской литосферной плиты		
	KIEV в период 2003–2008 гг.	KIEV в период 2014–2022 гг.	ZAPV в период 2015–2022 гг.		KIEV в период 2003–2008 гг.	KIEV в период 2014–2022 гг.	ZAPV в период 2015–2022 гг.
V_N	$-11,2$	$-17,7$	$-17,4$	$-13,2$	$-2,1$	$-4,5$	$-4,2$
V_E	$28,3$	$30,3$	$32,0$	$24,3$	$4,0$	$6,0$	$7,7$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Оценки косейсмических смещений на пункте KIEV составили $-28,9$ мм по северной и $22,2$ мм по восточной компонентам и показывают удовлетворительную сходимость со значениями для юга Приморья из статьи [1].

2. Скорость пункта KIEV до землетрясения Тохоку 2011 года составляла 30 мм/год. Это значение на $4,5$ мм/год отличается от модельного значения, вычисленного с использованием модели движения плит ITRF2014. Это может говорить о том, что исследуемый район находится на блоке, который имеет элементы вращения, отличные от вмещающей его плиты. Либо же эта разница обусловлена неточностями модели ITRF2014, так как в нашем регионе практически нет пунктов, которые использовались для построения модели.

3. Скорости после землетрясения Тохоку 2011 года отличаются от скоростей до него. Станция KIEV в период 2014–2022 гг. двигается к юго-востоку со скоростью 35 мм/год, а пункт ZAPV – к юго-востоку со скоростью 36 мм/год. Увеличение скоростей, наиболее вероятно, связано с продолжающейся постсейсмической релаксацией – типичным явлением для мощных коровых землетрясений.

4. Сколько-нибудь значительные взаимные движения пункта KIEV и ZAPV нами не обнаружены.

5. Наблюдается систематическое опускание пункта KIEV со скоростью $-6,7$ мм в год. Вероятнее всего, это локальное явление, связанное с особенностями закладки геодезического центра в надпойменной террасе реки Киевка.

Благодарности: авторы выражают глубокую благодарность всем коллегам, на протяжении многих лет участвовавшим в проведении ГНСС-наблюдений. Работа выполнена при поддержке гранта ДВФУ № 22-07-01-007, государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 075-00771-22-00 (НИОКТР ИПМ ДВО РАН № АААА-А20-120120390006-0), а также с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН», финансируемого Минобрнауки России по соглашению №075-15-2021-663.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шестаков Н.В., Герасименко М.Д., Охзоно Мако. Движения и деформации земной коры Дальнего Востока Российской Федерации, вызванные землетрясением Тохоку 11.03.2011 г., и их влияние на результаты GNSS-наблюдений // Геодезия и картография. 2011. №8. С. 35–43.
2. Ashurkov S.V., Sankov V.A., Serov M.A., Lukyanov P.Yu., Grib N.N., Bordoniskii G.S., Dembelov M.G. Evaluation of present-day deformations in the Amurian Plate and its surroundings, based on GPS data // Russian Geology and Geophysics. 2016. Vol. 57. P. 1626–1634. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.008>.
3. Bletery Q., Sladen A., Delouis B., Vallée M., Nocquet J.-M., Rolland L., Jiang J. A detailed source model for the Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake reconciling geodesy, seismology, and tsunami records // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2014. Vol. 119. <https://doi.org/10.1002/2014JB011261>.
4. RTKLIB ver. 2.4.2 Manual // RTKLIB: An Open-Source Program Package for GNSS Positioning. URL: <http://rtklib.com/> (дата обращения: 22.03.2022).
5. Sorokin A.A., Makogonov S.V., Korolev S.P. The Information Infrastructure for Collective Scientific Work in the Far East of Russia // Scientific and Technical Information Processing. 2017. Vol. 44, No. 4. P. 302–304.
6. Timofeev V.Yu., Gornov P.Yu., Ardyukov D.G., Malyshev Yu.F., Boiko E.V. GPS Measurements (2003–2006) in the Sikhote Alin Network, the Far East // Russian Journal of Pacific Geology. 2008. Vol. 2, No. 4. P. 314–324. <https://doi.org/10.1134/S1819714008040040>
7. Zonenshain L.P., Savostin L.A. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia // Tectonophysics. 1981. No. 76. P. 1–45. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90251-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90251-1).
8. Zuheir Altamimi, Laurent Metivier, Paul Rebischung, Helene Rouby and Xavier Collilieux ITRF2014 Plate Motion Model // Geophysical Journal International. 2017. No. 209. P. 1906–1919. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx136>.

CONTEMPORARY CRUSTAL MOVEMENT AT THE SOUTHERN EDGE OF CENTRAL SIKHOTE-ALIN FAULT ACCORDING TO GNSS-OBSERVATIONS

A. A. Salakhutdinova¹, [0000-0003-4760-8980], N. V. Shestakov^{1, 2}, [0000-0003-3901-9684],

E. A. Lyalushko¹, [0000-0002-9081-6323], N. A. Gagarsky¹, [0000-0001-7305-1376]

¹Far Eastern Federal University (FEFU, Russia)

²Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IPM FEB RAS, Russia)

Abstract

The Central Sikhote-Alin Fault (CSAF) is one of the largest tectonic structures in the continental part of the south of the Russian Far East. Its modern geodynamic activity is still very poorly understood, especially by remote sensing methods. The available geological estimates of movements along the CSAR reach several mm/year, however, the available scattered modern geodetic data allow us to state that no displacements exceeding a few mm/year have been detected in the central part of the fault.

In the present work, based on the data of GNSS observations carried out in the first two decades of the 21st century, the first quantitative estimates of the secular (plate) movements of the Earth's crust in the vicinity of the village of Kievka (Primorsky Krai), located at the southern end of the CSAR, are obtained. Also, in the study area, numerical modeling of the effect of geoenvironment disturbances (co- and postseismic displacements) initiated by the catastrophic Tohoku earthquake on March 11, 2011, Mw 9.1, was evaluated and performed. The results obtained are in good agreement with the available models of the earthquake source and models of postseismic viscoelastic relaxation of the geoenvironment.

This work was supported by the FEFU research grant no. 22-07-01-007, research theme AAAA-A20-120120390006-0 of IAM FEB RAS, and use resources of "Center for processing and storage of scientific data of FEB RAS", funded by the Ministry of Education and Science of Russia under agreement No. 075-15-2021-663 and 075-00771-22-00.

Keywords: GNSS measurements, coseismic and postseismic displacements, 2011 Tohoku earthquake, Russian Far East.

REFERENCES

1. *Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Ohzono Mako.* Dvizheniya i deformacii zemnoj kory Dal'nego Vostoka Rossijskoj Federacii, vyzvannye zemletryase-niem Tohoku 11.03.2011 g., i ih vliyanie na rezul'taty GNSS-nablyudenij // *Geodeziya i kartografiya.* 2011. №8. P. 35–43.
2. *Ashurkov S.V., Sankov V.A., Serov M.A., Lukyanov P.Yu., Grib N.N., Bordonskii G.S., Dembelov M.G.* Evaluation of present-day deformations in the Amurian Plate and its surroundings, based on GPS data // *Russian Geology and Geophysics.* 2016. Vol. 57. P. 1626–1634. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.008>.
3. *Bletery Q., Sladen A., Delouis B., Vallée M., Nocquet J.-M., Rolland L., Jiang J.* A detailed source model for the Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake reconciling geodesy, seismology, and tsunami records // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* 2014. Vol. 119. <https://doi.org/10.1002/2014JB011261>.
4. RTKLIB ver. 2.4.2 Manual // RTKLIB: An Open-Source Program Package for GNSS Positioning. URL: <http://rtklib.com/> (date of access: 03/22/2022).
5. *Sorokin A.A., Makogonov S.V., Korolev S.P.* The Information Infrastructure for Collective Scientific Work in the Far East of Russia // *Scientific and Technical Information Processing.* 2017. Vol. 44, No. 4. P. 302–304.
6. *Timofeev V.Yu., Gornov P.Yu., Ardyukov D.G., Malyshev Yu.F., and Boiko E.V.* GPS Measurements (2003–2006) in the Sikhote Alin Network, the Far East // *Russian Journal of Pacific Geology.* 2008. Vol. 2, No. 4. P. 314–324. <https://doi.org/10.1134/S1819714008040040>
7. *Zonenshain L.P., Savostin L.A.* Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia // *Tectonophysics.* 1981. No. 76. P. 1–45. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90251-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90251-1).
8. *Zuheir Altamimi, Laurent Metivier, Paul Rebischung, Helene Rouby and Xavier Collilieux* ITRF2014 Plate Motion Model // *Geophysical Journal International.* 2017. No. 209. P. 1906–1919. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx136>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



САЛАХУТДИНОВА Алина Альбертовна, студентка 4-го курса направления «Прикладная геодезия» Департамента мониторинга и освоения георесурсов Политехнического института ДВФУ, г. Владивосток.

Alina SALAKHUTDINOVA, 4th year student in the direction of "Engineering Geodesy" of the Department of Monitoring and Development of Georesources Polytechnical Institute FEFU, Vladivostok.

e-mail: salakhutdinova.aa@students.dvfu.ru

ORCID ID: 0000-0003-4760-8980



ШЕСТАКОВ Николай Владимирович, кандидат технических наук, профессор Департамента мониторинга и освоения георесурсов Политехнического института ДВФУ/научный сотрудник Института прикладной математики ДВО РАН, г. Владивосток.

Nikolai SHESTAKOV, PhD, professor of the Department of Monitoring and Development of Georesources Polytechnical Institute FEFU/ Researcher of Institute for Applied Mathematics FEB RAS, Vladivostok.

e-mail: shestakov.nv@dvfu.ru

ORCID ID: 0000-0003-3901-9684



ЛЯЛЮШКО Евгений Андреевич, заведующий лаборатории ГНСС-технологий мониторинга геосфер, ассистент Департамента мониторинга и освоения георесурсов Политехнического института ДВФУ, г. Владивосток.

Evgeniy LYALYUSHKO, head of the laboratory of GNSS technologies for monitoring the geospheres, assistant of the Department of Monitoring and Development of Georesources Polytechnic Institute FEFU, Vladivostok.

e-mail: lialiushko.ea@dvfu.ru

ORCID ID: 0000-0002-9081-6323



ГАГАРСКИЙ Николай Анатольевич, старший преподаватель департамента мониторинга и освоения георесурсов Политехнического института ДВФУ, Заслуженный работник геодезии и картографии Российской Федерации, г. Владивосток.

Nikolai GAGARSKY, senior lecturer of the Department of Monitoring and Development of Georesources of the Polytechnic Institute FEFU, Honored worker of geodesy and cartography of the Russian Federation, Vladivostok.

e-mail: nagagarsky@mail.ru

ORCID ID: 0000-0001-7305-1376

Материал поступил в редакцию 9 ноября 2022 года

УДК 550.311: 551.24

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ГРАНИЦЕ АСТЕНОСФЕРА–ЛИТОСФЕРА (МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ)

А. Н. Четырбоцкий [0000-0002-3982-3608]

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток

chetyrbotsky@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрена конвекция вещества верхней мантии Земли, которая в приближении Обербека–Буссинеска обусловлена термогравитационной дифференциацией. В рамках этого приближения выполнено 2-D численное моделирование конвективных течений вещества среды. Уравнение для температуры следует из соотношения баланса энтропии, где вследствие учета в системе переменной вязкости присутствует эффект диссипации энергии. Краевые условия отвечают задаче общепринятой на границе верхней и нижней мантий температуры, а для боковых границ – их теплоизолированность. На границе астеносфера–литосфера приняты допущения о том, что динамика тепла определяется его потоком с ближнего к границе слоя астеносферы, рассеиванием части тепла вдоль границы и расходами тепла на плавление вещества литосферы. Численное решение определяющих уравнений выполнено в переменных функция тока – завихренность. Приведена итерационная схема их решения. Обсуждены вопросы программной реализации аппарата численного моделирования. Показано, что при таких краевых условиях в рассматриваемой системе формируется квазипериодический режим колебаний тепла.

Ключевые слова: астеносфера, приближение Обербека–Буссинеска, мантийная конвекция, граничные условия, численный алгоритм.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным исследованиям, основным движущим механизмом динамики глубинных геосфер и дрейфа материков является крупномасштабная

мантийная конвекция. Достоверность этого утверждения следует из того, что вещество в мантии ведет себя как твердое тело только при быстро изменяющихся нагрузках, а при длительных нагрузках оно обретает способность течь подобно вязкой жидкости [11]. Важность изучения мантийной конвекции обусловлена также ее значимостью при рассмотрении вопросов динамики вещества геосфер, детального понимания строения и динамических свойств периферических оболочек Земли, в частности, земной коры. По существу, сама кора и ее тонкий поверхностный слой – океаны и атмосфера – являются дистиллятами верхней мантии, которая ответственна также и за силы, вызывающие медленное перемещение континентов [29]. Самостоятельный интерес состоит в изучении динамических процессов на границах геосфер, в особенности, в зоне непосредственного контактного взаимодействия двух различных механизмов переноса тепла: конвективного в сравнительно маловязкой астеносфере и кондуктивного в твердой литосфере.

На современном этапе исследований мантийной конвекции Земли принимается положение, что она имеет химико-плотностную (концентрационную) природу [5, 12, 27, 19]. Для ее численного моделирования используются уравнения Стокса обычно в приближении Обербека–Буссинеска (ОБ) [2]. Вот уже на протяжении порядка 40 лет решение таких задач выполняется для различных форм представления вязкости среды и заданием постоянных значений для условий Дирихле или Неймана на границах расчетной области. При этом везде полагается, что имеется теплоизолированность боковых границ (отсутствие потоков тепла через боковые границы). Так, МакКензи [35] в терминах завихренности – функция тока выполнил численное моделирование тепловой конвекции в среде с постоянной вязкостью, а Гарнис [32] – в среде, где вязкость экспоненциально возрастает с глубиной. Н.Л. Добрецов и А.Г. Кирдяшкин [3] экспериментально и теоретически исследовали конвекцию в зонах субдукции и в мантии. На основании результатов проведения сейсмической томографии В.П. Трубицын [22] теоретически обосновал построение модели тепловой конвекции в верхней мантии, где учитываются фазовые переходы.

Несмотря на широту охвата различных проблем верхнемантийной конвекции, рассмотренных в этих и серии других подобных работ [30, 36, 24, 40, 10, 21,

б], на должном физическом уровне не рассматриваются вопросы математической формализации динамических условий в зоне контакта реологически контрастных сред. Везде принимается, что литосфера должна повсеместно подстилаться астеносферой, вязкость которой на один – два порядка меньше таковой у литосферы (10^{19} – 10^{20} П против 10^{21} П). Между тем, именно здесь создаются условия для плавления вещества литосферы. На его реализацию затрачивается определенная тепловая энергия. При этом отдельные участки нижней границы литосферы представляют собой экранирующую для тепла зону. Актуальность рассмотрения подобных краевых условий обусловлена проблемами изучения временной цикличности функционирования магматических очагов, присутствующих в астеносфере. Представляется, что именно на этой границе как раз создаются такие условия.

Известен ряд способов относительного простого разрешения указанных проблем. В частности, в работах [4, 21–26, 34, 17, 27] моделью литосферы выступает высоковязкий кондуктивный слой квазижидкости с нулевой скоростью движения его вещества (по сути, твердое вещество). Остальная часть верхней мантии участвует в верхнемантийной конвекции. Ее модель задается несжимаемой жидкостью, реологические свойства которой характеризуются конкретной формой представления вязкости. Суммарное воздействие на литосферу процессов, происходящих в мантии, определяется заданием на нижней границе литосферы постоянного теплового потока [37] или тепловой струи постоянной мощности [39]. Проскальзывание на границах области обычно принимается в качестве граничных условий для скорости мантийного течения.

В условиях сохранения положений, принятых выше для обеих сред, предметом рассмотрения другого подхода является фазовый переход, происходящий на границе астеносфера–литосфера. А именно, полагается, что на границе астеносфера–литосфера при одинаковом химическом составе их пород в кристаллической структуре слагающих единого вещества происходит частичный фазовый переход. В связи с этим для ее математического описания можно использовать соотношения типа условия Стефана. Так же, как в предыдущем случае, полагается, что литосфера соответствует высоковязкому веществу, а остальная часть верхней мантии – несжимаемой конвектирующей жидкости. Тогда происходящее на границе плавление литосферы определяется фазовым переходом: твердое вещество

литосферы переходит в его жидкое состояние (вещество астеносферы) под влиянием тепловых процессов. Сама же граница фазового перехода подлежит определению [7, 8].

Необходимо заметить, что в обоих случаях принимается постоянность граничных условий. Между тем на этой границе могут создаваться динамические условия для активизации цикличности функционирования магматических очагов, присутствующих на границе астеносфера–литосфера. Цель настоящей работы как раз и заключается в изучении способов решения указанных вопросов. Здесь также рассмотрена схема решения нелинейных модельных уравнений, обсуждены проблемы программной реализации аппарата численного моделирования.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Модельным представлением верхней мантии ниже, как обычно, выступает вязкая несжимаемая жидкость в поле силы тяжести. При этом полагаем непрерывной границу астеносфера–литосфера или что литосфера везде подстилается астеносферой. Поскольку вещество Земли имеет высокую вязкость, для численного моделирования ее конвекции используем двумерные уравнения Стокса (линеаризованная стационарная форма полных уравнений Навье–Стокса [20]) в приближении ОБ. Их тензорная запись такова

$$\partial \sigma_{ij} / \partial X_j + \rho_0 \alpha g \delta_{i,2} T' = 0, \quad (1)$$

где $i, j = 1 \div 2$; $X = (X_1, X_2)$ – переменные декартовой системы координат ($X_1 = X_2 = 0$ в левом нижнем углу); ось X_1 направлена слева направо, а ось X_2 направлена вверх; ρ_0 – характерное для верхней мантии значение плотности; α – коэффициент термического расширения; g – ускорение силы тяжести; δ_{ij} – символ Кронекера; $T' = T'(X, t)$ – температура среды в точке X в момент времени t ; σ_{ij} – тензор напряжений: $\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \tau_{ij}$, где p – давление; τ_{ij} – тензор вязких напряжений: $\tau_{ij} = \eta' (\partial V_1 / \partial X_2 + \partial V_2 / \partial X_1)$, η' – динамическая вязкость (функция температуры и давления) вещества среды; V_i – составляющие

вектора скорости среды, которые удовлетворяют условию несжимаемости жидкости

$$\partial V_1 / \partial X_1 + \partial V_2 / \partial X_2 = 0.$$

В приближении ОБ (изменение плотности учитывается только при записи ρg) и принятых обозначениях запись общего уравнения переноса тепла в вязкой жидкости принимает вид [9]

$$\partial T' / \partial t' + \partial(V_i T') / \partial X_i = \chi \nabla^2 T' + (\eta / 2c_p \rho_0)(\partial V_1 / \partial X_2 + \partial V_2 / \partial X_1)^2, \quad (2)$$

где t' – текущее время, χ – коэффициент температуропроводности, c_p – теплоемкость вязкой жидкости и $\nabla^2 = \partial^2 / \partial X_1^2 + \partial^2 / \partial X_2^2$ – оператор Лапласа в переменных X_1 и X_2 .

Обезразмеривание (1) и (2) здесь выполняется стандартным образом:

$$(x, y) = (X_1, X_2) / H, \quad t = t' H / V_0, \quad T = (T' - T^*) / \Delta T, \\ \eta = \eta' / \eta_0, \quad R_a = \alpha g \rho_0 H^3 \Delta T / \chi \eta_0, \quad (3)$$

где H – характерный вертикальный размер области (здесь он равен толщине верхней мантии без толщины литосферы); V_0 – характерное значение скорости верхнемантийных течений; $\Delta T = T_* - T^*$ – характерный для верхней мантии диапазон изменения ее температуры, где T_* – температура на нижней подошве верхней мантии, а T^* – температура фазового перехода; R_a – число Рэлея.

В зависимости от выбора значения характерной скорости V_0 существует два способа представления (1). Здесь для V_0 принимается соотношение $V_0 = \chi / H$, которое при $R_a < 10^7$ следует использовать для численного моделирования [32].

В переменных функция тока – завихренность обезразмеренные уравнения модели верхнемантийной конвекции трансформируются в уравнение для завихренности ξ

$$\nabla^2(\eta\xi) = -R_a \frac{\partial T}{\partial x} - 2 \left[\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \right], \quad (4)$$

уравнение Пуассона для функции тока ψ

$$\nabla^2 \psi = -\xi \quad (5)$$

и безразмерное уравнение переноса тепла в вязкой жидкости

$$\partial T / \partial t + \partial(uT) / \partial x + \partial(vT) / \partial y = \nabla^2 T + b_T \eta (\partial u / \partial y + \partial v / \partial x)^2, \quad (6)$$

где $b_T = \eta_0 \chi / (2c_p \rho_0 H^2 \Delta T)$. Второй член в правой части характеризует скорость тепловыделения за счет вязкой диссипации. В (6) составляющие u и v вектора безразмерной скорости вычисляются согласно определению функции тока [9]

$$u = \partial \psi / \partial y \text{ и } v = -\partial \psi / \partial x. \quad (7)$$

Вследствие (7), уравнение неразрывности выполняется автоматически.

Граничные условия для температуры T определяются следующим образом: полагается теплоизолированность $\partial T / \partial x = 0$ вертикальных границ и $T = 1$ на дне верхней мантии. Поскольку формулировке условий на границе $A \cap L$ астеносферы (A) и литосферы (L) не уделяется должного внимания (обычно принимается постоянство ее температуры или теплового потока [38, 34, 25, 17]), то представляется полезным ниже следующее их частное рассмотрение. Далее всюду полагается, что эта граница соответствует верхнему слою области вычислений.

При постановке условия для T на границе $A \cap L$ здесь учитывается факт динамических изменений потоков тепла при ее переходе. Отмеченные изменения обусловлены различием реологических свойств этих сред и, следовательно, определенными затратами тепла на частичное плавление вещества литосферы. При этом, поскольку само плавление происходит в течение некоторого времени (оно происходит не мгновенно), то происходит некоторое запаздывание его дальнейшего следования в периферийные геосферы Земли. Данная ситуация может привести к аккумуляции тепла и росту давления непосредственно на нижней стороне границе $A \cap L$. В зависимости от толщины литосферы, ее состава, физиче-

ской обстановки режима верхнемантийной конвекции, низкой теплоотдачи нижнего края литосферы и ряда других факторов на ней далее могут создаются условия для последующего ее пульсирующего разогрева.

При построении модели рассматриваемого процесса были приняты во внимание обстоятельства того, что на тепловую энергию Q (в дальнейшем – просто тепло) участков границы влияет тепло только с ближайшего к границе слоя астеносферы. Допускаются также его рассеивание вдоль горизонтального направления (диффузия тепла) и его определенные затраты на реализацию фазового перехода. В рассматриваемом случае полагается, что такие расходы пропорциональны Q . Тогда динамику распространения тепла в этой зоне можно записать в виде

$$[\partial Q / \partial t + \partial(vQ) / \partial y] |_{A \cap L} = \partial(D_Q \partial Q / \partial x) / \partial x |_{A \cap L} - \mathcal{Y} Q |_{A \cap L},$$

где $\mathcal{Y} Q$ – затраты тепла (реализация фазового перехода на $A \cap L$); \mathcal{Y} – неотрицательный коэффициент пропорциональности (в общем случае функция динамических переменных модели); D_Q – теплопроводность границы. Данное балансовое соотношение, по своей сути, есть записанное в консервативной форме одномерное уравнение переноса тепла к границе с рассеиванием его вдоль нее (по горизонтальной координате): его левая часть характеризует динамику притока/оттока тепла к границе астеносферы и литосферы, а правая часть – рассеивание тепла и его затраты на плавление пород литосферы. Подстановка в него термодинамического соотношения для зависимости тепла от температуры $dQ \equiv c_p \rho dT$ [15] приводит к такому уравнению для температуры на $A \cap L$

$$[\partial T / \partial t + \partial(vT) / \partial y] |_{A \cap L} = \partial(D_Q \partial T / \partial x) / \partial x |_{A \cap L} - \mathcal{Y} T |_{A \cap L},$$

где c_p, ρ – теплоемкость и плотность вещества границы. При записи этого соотношения введено переобозначение $\mathcal{Y} / c_p \rho$ через \mathcal{Y} и учтено приближение ОБ: изменение плотности учитывается только при рассмотрении произведения ρg .

При численном моделировании граница $A \cap L$ определяется множеством $\{(x, y), y = 1\}$. В геодинамике традиционно принимается отсутствие в толще литосферы течений ее вещества. Поэтому $v(x, 1 + \Delta y, t) = 0$ при $x \in A \cap L$, где Δy –

принятая в вычислениях дискретность вертикальной координаты. Таким образом, запись уравнения динамики температуры при использовании центральной разностной аппроксимации конвективного члена $\partial(vT)/\partial y$ примет вид

$$dT(x,1,t)/dt = D_0 \partial^2 T / \partial x^2 + (2\Delta x)^{-1} v(x,1-\Delta y,t)T(x,1-\Delta y,t) - \gamma T(x,1,t), \quad (8)$$

где d/dt – обыкновенная производная, которая характеризует скорость изменения дифференцируемой величины в конкретной точке; Δx – принятая при численном моделировании дискретность горизонтальной координаты.

Согласно (8) динамика температуры для участков границы $A \cap L$ определяется ее рассеиванием вдоль горизонтального направления (первый член правой части), притоком/оттоком тепла из ближайшего к ней слоя астеносферы (второй член) и затратами на плавление (третий член). При восходящем мантийном потоке $v(x,1-\Delta y,t) > 0$ следует приток тепла к участкам границы, а при нисходящем мантийном потоке $v(x,1-\Delta y,t) < 0$ – его отток.

Граничные условия для функции тока ψ задаются следующим образом: для нее заданы условия проскальзывания $\psi = 0$ и $\partial^2 \psi / \partial n^2 = 0$ на всех границах, кроме участков $A \cap L$, где имеет место прилипание $\psi = 0$ и $\partial \psi / \partial n = 0$. Тогда на ней завихренность ξ определяется соотношением Тома [16]

$$\xi = -2\psi(x,1-\Delta y,t) / \Delta y^2. \quad (9)$$

На остальных границах вычислительной области ξ равна нулю.

В пренебрежении рассеиванием тепла вдоль границы $A \cap L$ уравнение (8) можно записать в виде

$$dT(x,1,t)/dt = f(t) - \gamma T(x,1,t),$$

где $f(t)$ – второй член правой части (8) (введено для удобства изложения). Решение этого линейного уравнения определяется выражением

$$T(x,1,t) = \int_0^t f(\tau) \exp[-\gamma(t-\tau)] d\tau.$$

В представлении функции $f(t)$ посредством ее разложения в ряд Фурье температура $T(x,1,t)$ примет вид

$$T(x,1,t) = \sum_p \frac{\omega_p}{\omega_p^2 + \gamma^2} [f_{p,1}(\sin \omega_p t + \frac{\gamma}{\omega_p^2} \cos \omega_p t) + f_{p,1}(\cos \omega_p t + \frac{\gamma}{\omega_p^2} \sin \omega_p t)],$$

где $\{f_{p,1}, f_{p,2}\}$ – коэффициенты разложения $f(t)$ в ряд Фурье, $\{\omega_p\}$ – соответствующие частоты. Из этого соотношения непосредственно вытекает, что при $p \rightarrow \infty$ (высокие частоты $\omega_p \rightarrow \infty$) под знаком суммы первый сомножитель правой части (он порядка $1/\omega_p$) стремится к нулю. Таким образом, на границе $A \cap L$ происходит подавление высокочастотных вариаций распределения температуры верхней мантии.

АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Пространственной область рассмотрения здесь является прямоугольник, размер вертикальных сторон которого равен глубине верхней мантии H , а горизонтальных сторон – L . После обезразмеривания уравнений модели вертикальный размер области вычислений равен 1, а ширина равна L/H (в подобных задачах это так называемое аспектное число). Дискретизация области вычислений по переменным x , y и t выполняется с постоянным по каждому направлению шагом: $x_i = i\Delta x$, $i=1 \div N$, $\Delta x = 1/(N-1)$; $y_j = j\Delta y$, $j=1 \div M$, $\Delta y = L/H(M-1)$; $t_k = k\Delta t$, $k=1 \div K$, $\Delta t = 1/(K-1)$.

Алгоритм численного решения уравнений модели состоит в нахождении заданных на регулярной пространственно-временной сетке $\{x_i, y_j, t_k\}$ значений $\{T_{i,j}^k, \psi_{i,j}^k, \xi_{i,j}^k, u_{i,j}^k, v_{i,j}^k\}$. При известных в момент $t = t_k$ их значениях для вычисления $\{T_{i,j}^{k+1}, \psi_{i,j}^{k+1}, \xi_{i,j}^{k+1}, u_{i,j}^{k+1}, v_{i,j}^{k+1}\}$ в момент $t = t_{k+1}$ требуется выполнить цикл из трех последовательных шагов.

Первый шаг: решается уравнение (4). Для этого обычно используется метод стабилизирующей поправки [33]. Этот метод представляет собой итерационную двухшаговую процедуру, на каждом шаге которой требуется вычислить элементы матрицы линейной системы уравнений. Также требуется численно вычислять частные производные вплоть до четвертого порядка. Более эффективной является рассмотренная в [32] итерационная процедура.

Сначала вводится переменная $\varphi_{i,j}^{k+1} = \nabla^2 (\eta \xi)_{i,j}^{k+1}$. Тогда алгоритм нахождения $\{\xi_{ij}^{k+1}\}$ состоит из последовательности операций:

$$1. (\varphi_{i,j}^{k+1})^{m+1} = (1 - \delta)(\varphi_{i,j}^{k+1})^m + \delta\{-R_a L_x(T_{i,j}^k) - 2[w_1 L_{xx} + w_2 L_{yy} - 2w_3 L_x L_y](\psi_{i,j}^{k+1})^m\},$$

где m – номер итерации. Операторы L_x, L_y, L_{xx}, L_{yy} и вспомогательные выражения w_1, w_2, w_3 вводятся следующим образом:

$$\begin{aligned} L_x &= \{-1, 0, 1\} / 2\Delta x, L_y = \{-1, 0, 1\} / 2\Delta y, \\ L_{xx} &= \{1, -2, 1\} / \Delta x^2, L_{yy} = \{1, -2, 1\} / \Delta y^2 \\ w_1 &= L_{yy}(\eta_{i,j}^k), w_2 = L_{xx}(\eta_{i,j}^k), w_3 = L_x L_y(\eta_{i,j}^k) \end{aligned} \quad (10)$$

Величина $\eta_{i,j}^k = \eta(T_{i,j}^k, y_j)$ есть значение вязкости на глубине y_j , температура которой равна $T_{i,j}^k$. В рассматриваемом здесь случае полагается гидростатичность давления. В такой записи разностные операторы аппроксимируют соответствующие частные производные со вторым порядком точности, а полученные соотношения соответствуют центральным трехточечным разностным схемам.

$$2. \varepsilon = \max_{i,j} |(\varphi_{ij}^{k+1})^{m+1} - (\varphi_{ij}^{k+1})^m|;$$

3. для функции $(\varphi_{ij}^{k+1})^{m+1} \equiv ((\eta \xi)_{ij}^{k+1})^{m+1}$ решается уравнение Пуассона (4), после чего делением его на $\eta_{i,j}^k$ вычисляется $(\xi_{ij}^{k+1})^{m+1}$;

$$4. \text{ для функции } (\psi_{ij}^{k+1})^{m+1} \text{ решается уравнение Пуассона (5);}$$

5. если $\varepsilon > \varepsilon_0$, то надо вернуться к пункту 1, в ином случае – выход из процедуры вычисления искомого решения (ξ_{ij}^{k+1}) .

На границе $A \cap L$ выполняется условие прилипания (9) верхнемантийного течения $u_{i,M}^{k+1} = v_{i,M}^{k+1} = 0$, которое в терминах завихренность – функция тока записывается в виде [14] $\xi_{i,M}^{k+1} = -2\psi_{i,M-1}^{k+1} / \Delta y^2$.

Поскольку на остальных границах выполняется условие проскальзывания $\partial^2 \psi / \partial n^2 = 0$, то на них $\xi_{1,j}^{k+1} = \xi_{N,j}^{k+1} = \xi_{i,1}^{k+1} = 0$.

Согласно определению функции тока, она принимает нулевые значения на границах области вычислений. Поэтому на них выполняются соотношения

$$\psi_{1,j}^{k+1} = \psi_{N,j}^{k+1} = \psi_{i,1}^{k+1} = \psi_{i,M}^{k+1} = 0.$$

Вычислительные эксперименты, выполненные нами при $\delta = 0.5$ и $\varepsilon_0 = 3 \cdot 10^{-3}$, показали быструю сходимость алгоритма для каждого временного шага (обычно m не превосходило значения 6).

В третьем и четвертом блоках алгоритма нахождения $\{\zeta_{ij}^{k+1}\}$ из уравнения (4) и $\{\psi_{ij}^{k+1}\}$ из уравнения (5) требуется решить уравнение Пуассона. Выполненные вычислительные эксперименты показали, что эффективной является процедура [13], основанная на прямом методе решения уравнения Пуассона. Суть этого метода состоит в том, что искомая матрица решений этого уравнения заменяется эквивалентным ей вектором соответствующей размерности. Матрица коэффициентов, сформированная для вычисления такого вектора, не зависит ни от номера временного слоя k , ни от номера итерации m . Одна и та же матрица используется как для решения (4), так и для решения (5). Поэтому в начале программной реализации алгоритма достаточным является однократное ее формирование. Поскольку данная матрица является слабо заполненной (в выполненных вычислительных экспериментах заполнение матрицы не превышало 36%), целесообразным является хранение в памяти компьютера только ее ненулевых элементов. Кроме того, поскольку для детального анализа верхнемантийной конвекции требуются мелкие пространственные шаги, что соответствует высокой размерности матрицы, вместо ее обращения разумным представляется использование процедуры LU разложения такой матрицы на произведение нижней и верхней треугольных матриц.

Второй шаг: составляющие вектора скорости вычисляются посредством численного дифференцирования функции тока $u_{i,j}^{k+1} = L_y \psi_{i,j}^{k+1}$ и $v_{i,j}^{k+1} = -L_x \psi_{i,j}^{k+1}$.

Третий шаг: для решения уравнения теплопереноса используется неявная схема переменных направлений (продольно-поперечная схема [18] или схема дробных шагов [29]). Согласно этой схеме искомое численное решение определяется соотношениями

$$\begin{aligned} (T_{i,j}^{k+1/2} - T_{i,j}^k) / 2\Delta t + L_x(u_{i,j}^{k+1} T_{i,j}^{k+1/2}) - L_{xx} T_{i,j}^{k+1/2} &= -L_y(v_{i,j}^{k+1} T_{i,j}^k) + L_{yy} T_{i,j}^k + f(T_{i,j}^k) \\ (T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^{k+1/2}) / 2\Delta t + L_y(v_{i,j}^{k+1} T_{i,j}^{k+1}) - L_{yy} T_{i,j}^{k+1} &= -L_x(u_{i,j}^{k+1} T_{i,j}^{k+1/2}) + L_{xx} T_{i,j}^{k+1/2} + f(T_{i,j}^{k+1/2}), \quad (11) \\ f(T) &= \eta(T, y_j)(L_y u_{i,j}^{k+1} + L_x v_{i,j}^{k+1})^2 \end{aligned}$$

где составляющие вектора скорости являются уже известными.

При записи граничных условий для температуры используются конечно-разностные аппроксимации частных производных второго порядка точности. Так, на вертикальных границах

$$\begin{aligned} (\partial T / \partial x)_{1,j} &= -(11T_{1,j} - 18T_{2,j} + 9T_{3,j} - 2T_{4,j}) / 6\Delta x, \\ (\partial T / \partial x)_{N,j} &= (11T_{N,j} - 18T_{N-2,j} + 9T_{N-3,j} - 2T_{N-4,j}) / 6\Delta x. \end{aligned}$$

Поскольку они теплоизолированные (левые части этих соотношений нулевые), то

$$T_{1,j} = (18T_{2,j} - 9T_{3,j} + 2T_{4,j}) / 11 \quad \text{и} \quad T_{N,j} = (18T_{N-2,j} - 9T_{N-3,j} + 2T_{N-4,j}) / 11. \quad (12)$$

Так как эти соотношения используются для дробного $k + 1/2$ слоя и целого $k + 1$ слоя, то при их записи отсутствуют индексы временных слоев. Согласно (12), температура на вертикальных границах вычисляется на основании трех последующих/предшествующих внутренних вертикальных слоев. Значит, при заданных граничных условиях для расчетов по схеме (11) требуется выполнить $i = 2 \div N - 1$ таких вычислений. После подстановки (12) в левую часть первого уравнения (11) результаты действия сеточных операторов L_x, L_{xx} в узлах (x_2, j) и (x_{N-1}, j) явным образом не содержат значения на вертикальных границах и принимают вид

$$\begin{aligned} L_x T_{2,j} &= -2(T_{2,j} - T_{3,j}) / 3\Delta x, \\ L_{xx} T_{2,j} &= -2(T_{2,j} - T_{3,j}) / 3\Delta x^2 \\ L_x T_{N-1,j} &= -2(T_{N-2,j} - T_{N-1,j}) / 3\Delta x \\ L_{xx} T_{N-1,j} &= 2(T_{N-2,j} - T_{N-1,j}) / 3\Delta x^2 \end{aligned}$$

Поскольку на вертикальных границах горизонтальная скорость обращается в нуль, то во втором члене левой части первого уравнения (11) граничные значения T не учитываются.

Реализация вычислительной схемы (11) по каждому направлению выполняется методом прогонки. Поскольку матрицы соответствующих линейных систем имеют трехдиагональную структуру, то вместо квадратной матрицы соответствующей размерности достаточными являются хранения и использования только трех ее векторов.

В рамках рассматриваемой модели температура на границе $A \cap L$ определяется решением уравнения (8)

$$T_{i,M}^{k+1} = D_{\varrho} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{i-1,M}^k + T_{i+1,M}^k) + \left(1 - 2D_{\varrho} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} - \gamma \Delta t \right) T_{i,M}^k + \frac{\Delta t}{\Delta x} v_{i,M-1}^{k+1} T_{i,M-1}^k,$$

которое получается при его разностной аппроксимации.

Программная реализация данного алгоритма была выполнена в среде Matlab, которая изначально разрабатывалась фирмой MathWorks Inc. как интерактивная система матричных вычислений (Matrix Laboratory). Эта система может работать и в режиме вычислений, и в режиме интерпретатора программ, что эффективным образом обеспечивает отладку программ и интерактивную обработку результатов вычислений. В ее состав входит широкий набор функций, в которых реализованы современные методы матричных вычислений [31]. В состав этой программной системы входят функции для эффективной работы с разреженными матрицами. Так, использование для объявления разреженного массива функции sparse (хранение в памяти только не нулевых элементов матрицы) позволяет существенным образом экономно расходовать вычислительные ресурсы компьютера. Кроме того, использование процедуры movie среды Matlab позволяет в цветном представлении наблюдать на экране монитора динамику рассматриваемых событий в верхней мантии.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Численное моделирование выполнено для простого способа представления безразмерной динамической вязкости η в форме экспоненциальной функции, показателем которой является линейная функция безразмерной температуры и глубины [30]: $\eta = \exp[-a_T T + a_P (1 - y)]$, где a_T, a_P – безразмерные неотрицательные функции (в общем случае, функции пространственно-временных

переменных). При такой форме задания вязкости принимается гидростатичность давления. Для простоты a_T и a_P полагаются константами.

Начальное распределение для безразмерной температуры T задается выражением [25]

$$T(x, y, 0) = 1 - y + b_T \sin\left(\pi \frac{L}{H} x\right) \cos \pi y,$$

где L, H – горизонтальный и вертикальный размеры расчетной области; b_T – отрицательный параметр численного решения. Вертикальный профиль (9) есть функция, линейно возрастающая с глубиной, на которую накладывается малое возмущение.

Численное исследование структуры теплового потока верхнемантийной конвекции было выполнено при следующих значениях параметров среды: $\alpha = 3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $g = -9.8 \text{ м/с}^2$, $c_p = 1.25 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$, $\chi = 9.3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $T^* = 1320^\circ\text{C}$, $T_* = 1800^\circ\text{C}$, $\rho_0 = 3400 \text{ кг/м}^3$, $\eta_0 = 3 \cdot 10^{22} \text{ П}$, $b_T = 0.001$, $a_T = -0.4$, $a_P = 2.2$. Было также принято равенство D_Q и χ , т. е. $D_Q = 8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Вертикальный размер H определяется разностью характерного размера верхней мантии 660 км и характерной толщины литосферы 120 км, т. е. $H = 540 \text{ км}$; горизонтальный размер L был выбран равным 5400 км. Параметры численной схемы экспериментов составили: число узлов по горизонтальному направлению $N = 80$ (шаг $\Delta h_x = 67.5 \text{ км}$), число узлов по вертикальному направлению $M = 50$ (шаг $\Delta h_y = 10.8 \text{ км}$) и число временных слоев $K = 5000$. Согласно (2) и (3) временной промежуток составляет H^2 / χ или около 10 млрд. лет. Поэтому временной шаг составляет 2 млн. лет.

В рамках модели (4)–(8) и заданных начальных и граничных условий характер верхнемантийной конвекции вытекает из анализа временного изменения средних по области вычисления переменных модели, а также совместного изменения среднеквадратичной скорости V_{rms} и числа Нуссельта (рис. 1).

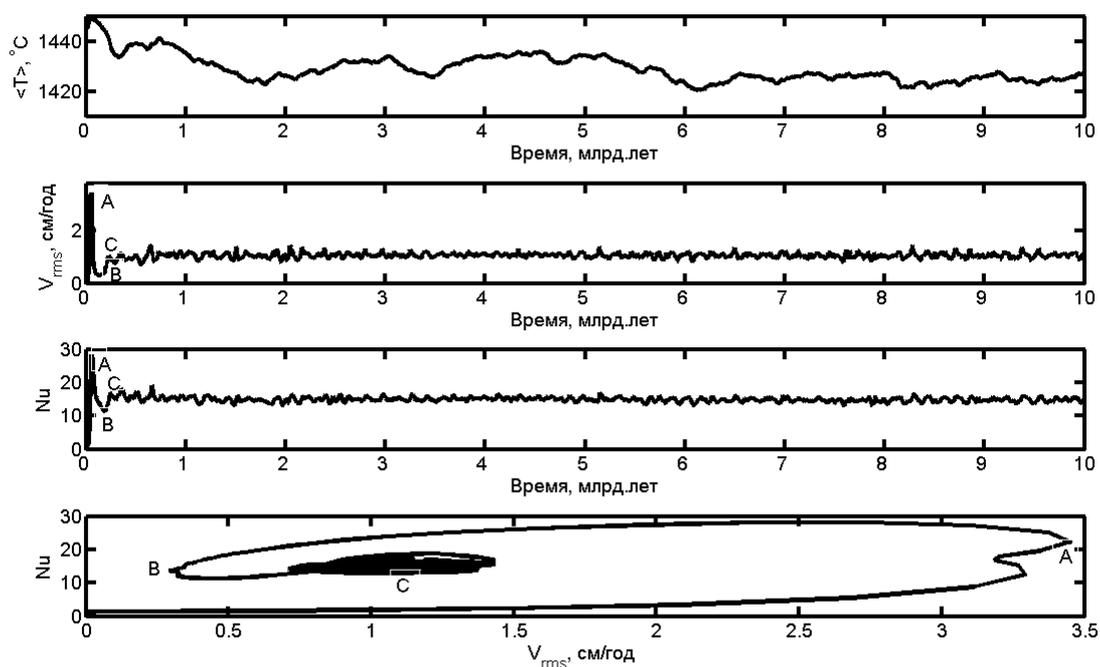


Рисунок 1. Временное изменение средней температуры $\langle T \rangle$, среднеквадратичной скорости V_{rms} , числа Нуссельта Nu , совместное изменение V_{rms} и Nu .

Распределение средней температуры $\langle T \rangle$ показывает снижение ее значений на протяжении первых 2 млрд. лет (рис. 1). Далее характер ее изменения в большей степени отвечает квазипериодическому режиму колебаний, продолжительность периода которого составляет 2 млрд. лет. Представляется, что такое временное поведение обусловлено сочетанием процессов конвективного прогрева и последующего за ним перемешивания вещества рассматриваемой области.

На первом этапе эволюции верхней мантии следует прогрев верхних слоев первичной астеносферы. Сам факт их существования обосновали А.В. Витязев и Г.В. Печерникова. Согласно работе [1], существенный нагрев недр части допланетных тел, дегазация, плавление и дифференциация примитивного вещества происходили уже на стадии их формирования, т. е. первые миллионы и десятки миллионов лет. Результатом этого прогрева является сначала падение ее вязкости, затем рост V_{rms} и интенсификация верхнемантийной конвекции (рост Nu) (участок OA на рис. 1). Верхняя мантия разбивается на конвективные ячейки, по

периметру которых всплывают горячие и опускаются холодные объемы ее вещества. Продолжительность этапа порядка 52 млн. лет (его окончание фиксируется точкой А). Анализ рис. 2 показывает наличие четырех областей перегретого мантийного вещества в окрестности границы астеносфера – литосфера и четырех областей охлажденного вещества – на нижней границе верхней мантии.

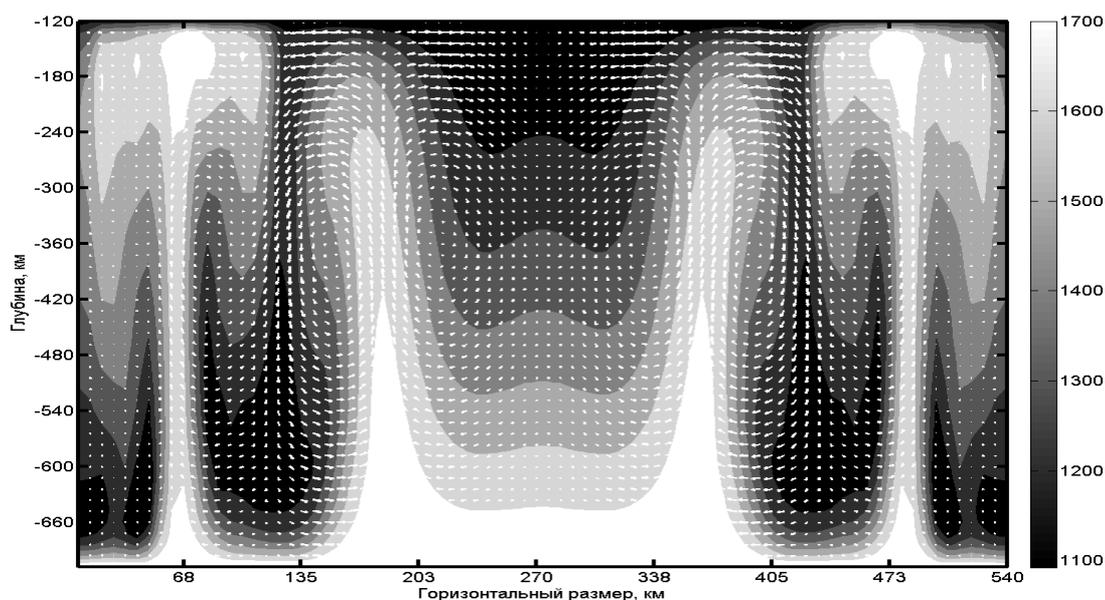


Рисунок 2. Распределение T (поле скорости конвекции характеризуют стрелки)

Каждая стрелка показывает направление скорости, а длина – ее величину. Разные оттенки серого цвета характеризуют распределения температуры. Так, более горячие и облегченные области верхней мантии представлены светлыми оттенками, а более холодные и утяжеленные области – более темными. Понятно, что конфигурация изотерм совпадает с границей цветов. Наличие в непосредственной окрестности литосферы областей перегретого вещества вызывает рост ее температуры, а наличие областей охлажденного вещества в окрестностях дна верхней мантии – их охлаждение.

После этапа совместного роста скорости и интенсификации конвективных течений следует этап их падения (участок АВ на рис. 1), которое вызвано сформированным к этому моменту устойчивым распределением плотности: более горячее и облегченное вещество попадает в верхние слои, а холодное и утяжеленное

– в нижние слои. В результате падения скорости течения механизм прогрева отключает конвективный режим прогрева. Продолжительность этого периода порядка 64 млн. лет (его окончание фиксируется точкой В). Анализ рис. 2 показывает расплывание областей перегретого и охлажденного верхнемантийного вещества. Поскольку на границе астеносфера–литосфера часть тепла экранируется, то в ее окрестности происходит накопление тепла. При этом вдоль самой границы по причине рассеивания части тепла происходит снижение его градиента.

На участке ВС рис. 1 вновь следует рост температуры астеносферы. Соответствующим образом растут V_{rms} и Nu , а также снова подключается конвективный режим прогрева. Продолжительность этого этапа составляет 52 млн. лет. Анализ рис. 2в вновь показывает наличие четырех областей перегретого вещества в окрестности границы астеносфера–литосфера, т. е. отмечается определенная цикличность состояния верхней мантии.

Характер временного изменения температуры в течение этих этапов на границе астеносфера–литосфера непосредственно вытекает из анализа рис. 3.

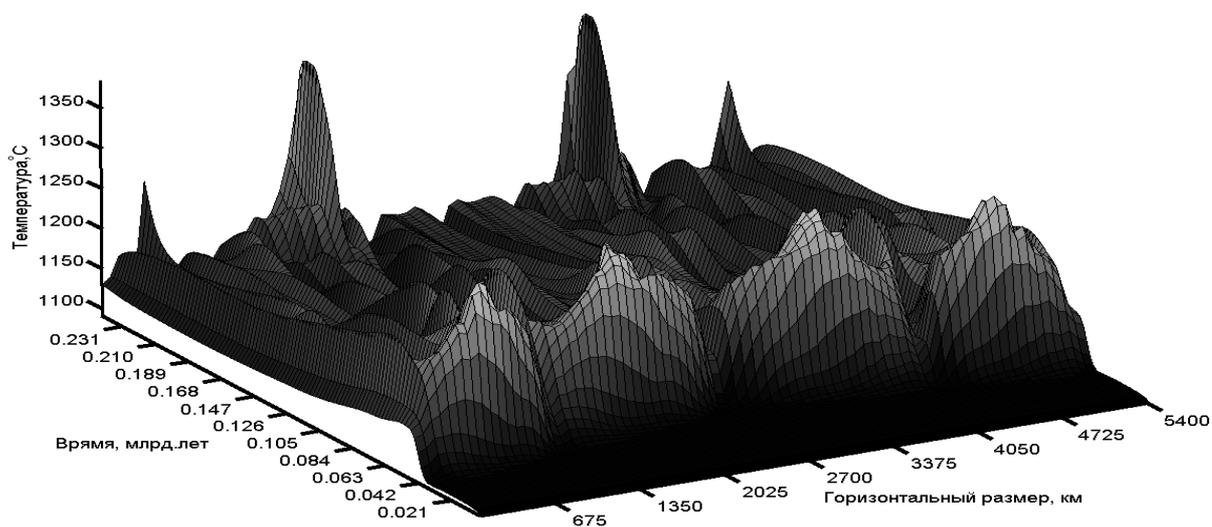


Рисунок 3. 3D распределение T в переменных время – горизонтальный размер

В частности, на границе сначала формируются участки перегретого вещества, которые затем остывают. Их остывание обусловлено тем, что согласно модели (8) часть тепла на этой границе расходуется на плавление пород литосферы. Далее вновь формируются участки перегретого вещества.

Распределение температуры в рассматриваемой области на заключительном временном отрезке представлено на рис. 4. Его анализ показывает наличие в окрестности границы астеносфера–литосфера двух областей перегретого вещества. Соответствующая ситуация отмечается и на рис. 5.

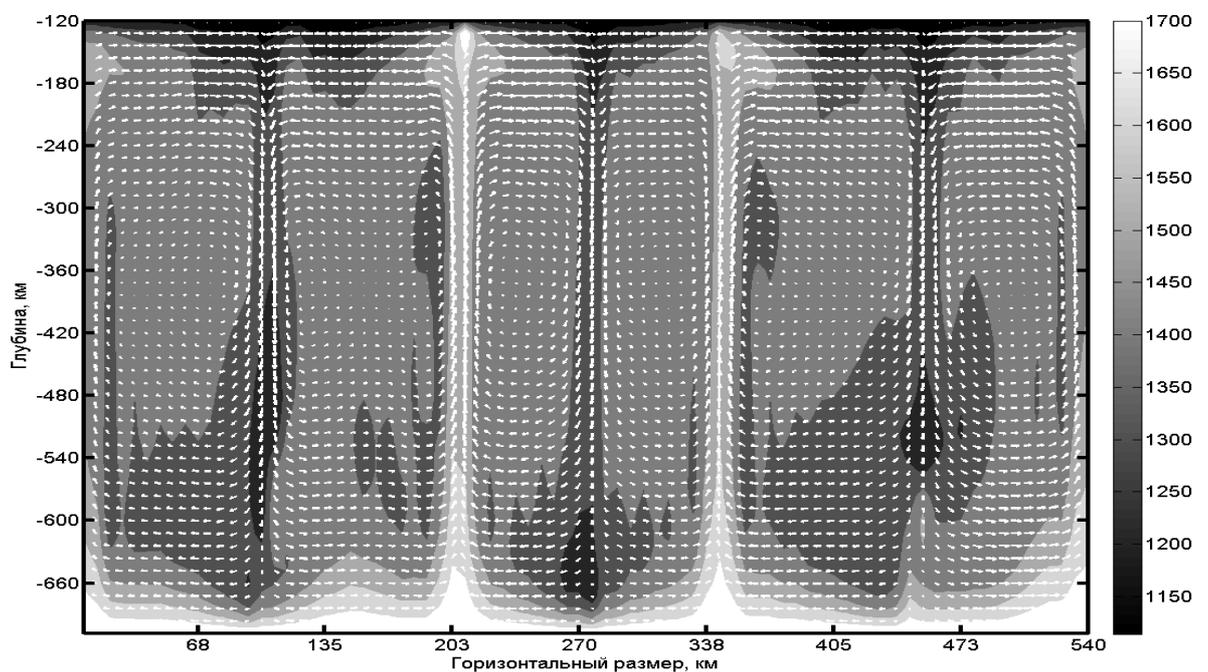


Рисунок 4. Распределение T : $t=9.9$ млрд. лет

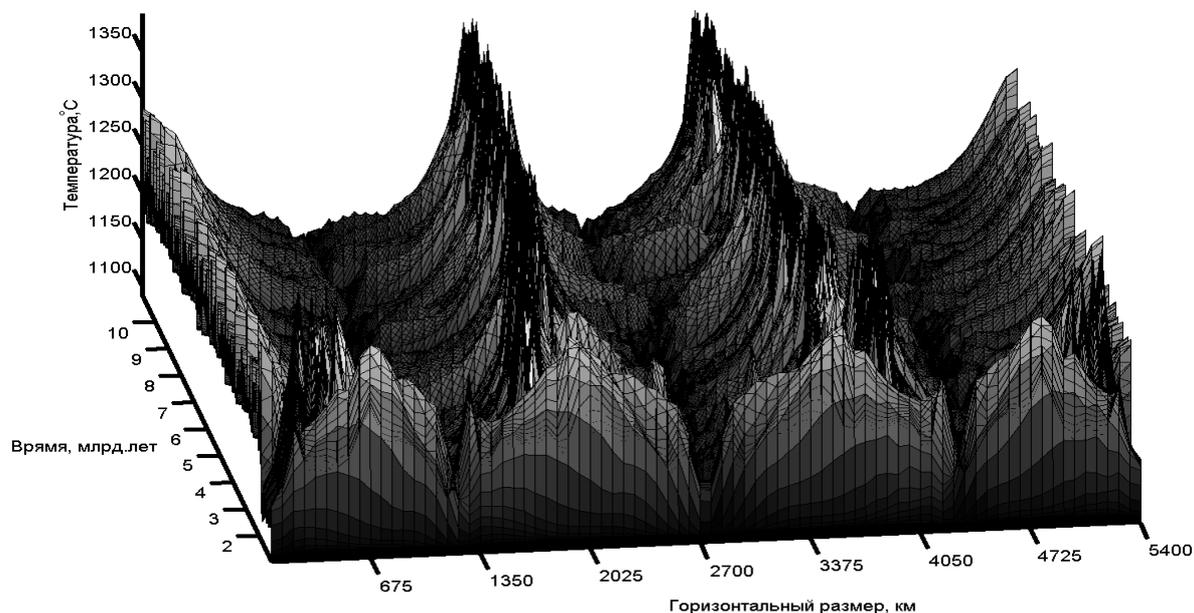


Рисунок 5. Распределение T : $t=9.9$ млрд. лет на границе астеносфера-литосфера

Коэффициент корреляции между V_{ms} и Nu для всего рассматриваемого периода равен 0.468. Между тем, для первого этапа OA он равен 0.897, этапа AB – 0.807 и BC – 0.962 (рис. 1). При этом вычисленная на основании всего набора корреляция между переменными статистически значимо отличается от таковой, которая была вычислена на основании части набора. Поэтому между этапами эволюции имеются значительные отличия. При этом резкая смена одного этапа другим показывает пульсирующий механизм верхнемантийной конвекции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании предположения о существовании на границе литосфера-астеносфера теплового волновода рассмотрены проблемы численного 2D моделирования теплового потока в верхней мантии Земли. Выполнена математическая формализация этого случая и приведен численный алгоритм решения поставленной задачи.

Результаты численного моделирования указывают на квазипериодический характер изменения динамических переменных рассматриваемой системы. Вме-

сте с тем, отмечаются отличия этапов их совместного изменения. Кроме того, резкая смена одного этапа другим показывает пульсирующий механизм верхнемантийной конвекции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Витязев А.В., Печерникова Г.В.* Ранняя дифференциация Земли и проблема лунного состава // Физика Земли. 1996. № 6. С. 3–6.
2. *Джозеф Д.* Устойчивость движения жидкости. М.: Мир, 1981. 638 с.
3. *Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г.* Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1994. 299 с.
4. *Занемонец В.Б., Котелкин В.Д., Мясников В.П.* О динамике литосферных движений // Физика Земли. 1974. № 5. С. 43–54.
5. *Кеонджян В.Н.* Модель химико-плотностной дифференциации мантии Земли // Физика Земли. 1980. № 8. С. 3–15.
6. *Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г., Сурков А.В.* Тепловая гравитационная конвекция в астеносфере под срединно-океаническим хребтом и устойчивость основных глубинных паргенезисов // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 1. С. 76–94.
7. *Коробицына Ж.Л., Овчарова А.С.* Применение метода фиктивных областей для задач тепловой конвекции // Тр. Конф. RDAMM-2001. 2001. С. 372–382.
8. *Коробицына Ж.Л., Тычков С.А.* Численное моделирование процессов тепло- и массопереноса с учетом фазового перехода в геодинамике // ЖВМиМФ. 1997. Т. 37. № 6. С. 733–741.
9. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Физматлит. 2003. 736 с.
10. *Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е.* Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 2004. 612 с.
11. *Монин А.Н.* История Земли. Л.: Наука, 1977. 228 с.
12. *Монин А.С., Сорохтин О.Г.* Об объемной гравитационной дифференциации Земли // ДАН СССР. 1981. Т. 259. № 5. С. 1076–1079.
13. *Мэтьюс Дж., Финк К.* Численные методы. Использование MATLAB. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. 720 с.

14. *Оран Э., Борис Дж.* Численное моделирование реагирующих потоков. М.: Мир, 1990. 660 с.

15. *Пригожин И., Кондепуди Д.* Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002. 461 с.

16. *Роуч П. Дж.* Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 618 с.

17. *Рычкова Е. В., Тычков С. А.* Численная модель тепловой конвекции в верхней мантии Земли под литосферой континентов // Вычислительные технологии. 1997. Т. 2. № 5. С. 66–81.

18. *Самарский А. А.* Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. 616 с.

19. *Сорохтин О. Г., Ушаков С. А.* Глобальная эволюция Земли. М.: Изд-во МГУ, 1991. 446 с.

20. *Темам Р.* Уравнения Навье–Стокса. Теория и численный анализ. М.: Мир, 1981. 408 с.

21. *Трубицын В. П.* Геодинамическая модель эволюции Тихого океана // Физика Земли. 2006, № 2. С. 3–25.

22. *Трубицын В. П.* Сейсмическая томография и дрейф континентов // Физика Земли. 2008. № 12. С. 83–91.

23. *Трубицын В. П., Баранов А. А., Евсеев А. Н., Трубицын А. П., Харыбин Е. В.* Влияние низковязкой астеносферы на мантийные течения // Физика Земли. 2006, № 12. С. 11–19

24. *Трубицын В. П., Николайчик В. В.* Режимы тепловой конвекции Земли // Физика Земли. 1991. № 6. С. 3–12.

25. *Трубицын В. П., Белавина Ю. Ф., Рыков В. В.* Тепловое и механическое взаимодействие мантии с континентальной литосферой // Физика Земли. 1993. № 11. С. 3–15.

26. *Трубицын В. П., Харыбин Е. В.* Геодинамическая модель дифференциации мантийного вещества в глубинах Земли // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 4. С. 83–89.

27. *Тычков С. А., Червов В. В., Черных Г. Г.* Численная модель трехмерной конвекции в верхней мантии Земли // Физика Земли. 2005. № 5. С. 48–64.

28. *Уайли П.* Земная мантия // УФН. 1977. Т. 121. № 1. С. 139–156.

29. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир. 1991. Т. 1. 504 с.
30. *Cristensen U.* Convection with pressure- and temperature-depend non Newtonian rheology // *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 1984. Vol. 77. No. 2. P. 343–384.
31. *Davis T.A.* UMFPAK Version 4.6 User Guide (<http://www.cise.ufl.edu/research/sparse/umfpack>), Dept. of Computer and Information Science and Engineering, Univ. of Florida, Gainesville, FL. 2002.
32. *Gurnis M., Davies G.F.* Numerical study of high Rayleigh number convection in a medium with depth-depend viscosity // *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 1985. Vol. 186, No. 85. P. 523–541.
33. *Houston M.H. Jr., De Bremaecker J.Cl.* ADI solution of free convection in a variable viscosity fluid // *J. of Comput. Physics.* 1974. Vol. 16. P. 231–239.
34. *Lowman J.P., Jarvis G.* Mantle convection flow reversals due to continental collisions // *Geophys. Res. Lett.* 1993. Vol. 20. P. 2087–2090.
35. *McKenzie D.P., Roberts J.M., Weiss N.O.* Convection in Earth's mantle: towards a numerical simulation // *J. Fluid Mech.* 1974. Vol. 62. Part 3. P. 465–538.
36. *Schubert G., Anderson C.A.* Finite element calculation of very high Rayleigh number thermal convection // *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 1985. Vol. 80. P. 298–318.
37. *Spohn T., Schubert G.* Convective thinning of the lithosphere: a mechanism for rifting and mid-plate volcanism on Earth, Venus and Mars // *Tectonophysics.* 1983. Vol. 94. P. 67-90.
38. *Torrance K.E., Turcotte D.L.* Thermal convection with large viscosity variations // *J. Fluid Mech.* 1971. Vol. 47. P. 113–125.
39. *Turcotte D., Emerman S.* Mechanism of active and passive rifting // *Tectonophysics.* 1983. Vol. 94. P. 39–50.
40. *Zhong S., Gurnis M., Moresi L.* Free-surface formulation of mantle convection—I. Basic theory and application to plume // *Geophys. J. Int.* 1996. Vol. 127. P. 708–718.

TEMPERATURE DISTRIBUTION AT THE BORDER ASTENOSPHERE–LITHOSPHERE (mathematical model)

A. N. Chetyrbotsky^[0000-0002-3982-3608]

Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy
of Sciences, Vladivostok

chetyrbotsky@yandex.ru

Abstract

The convection of matter in the Earth's upper mantle is considered, which in the Oberbeck–Boussinesq approximation is due to thermogravitational differentiation. Within the framework of this approximation, a 2-D numerical simulation of convective flows of the medium matter was performed. The equation for temperature follows from the entropy balance relation, where, due to taking into account the variable viscosity in the system, there is an effect of energy dissipation. The boundary conditions correspond to the assignment of the temperature generally accepted at the boundary of the upper and lower mantles, and for the lateral boundaries - their thermal insulation. At the asthenosphere–lithosphere boundary, assumptions were made that the heat dynamics is determined by its flow from the asthenosphere layer closest to the boundary, part of the heat dissipation along the boundary, and heat consumption for melting the lithosphere matter. Numerical solution of the constitutive equations is carried out in variables stream function - vorticity. An iterative scheme for their solution is given. The issues of software implementation of the numerical simulation apparatus are discussed. It is shown that under such boundary conditions, a quasi-periodic regime of heat oscillations is formed in the system under consideration.

Keywords: *asthenosphere, Oberbeck–Boussinesq approximation, mantle convection, boundary conditions, numerical algorithm.*

REFERENCES

1. Vityazev A.V., Pechernikova G.V. Rannyaya differenciaciya Zemli i problema lunnogo sostava // Fizika Zemli. 1996. № 6. S. 3–6.
2. Dzhozef D. Ustojchivost' dvizheniya zhidkosti. M.: Mir, 1981. 638 s.

3. Dobrecov N.L., Kirdyashkin A.G. Glubinnaya geodinamika. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN NIC OIGGM SO RAN, 1994. 299 s.
4. Zhanemonec V.B., Kotelkin V.D., Myasnikov V.P. O dinamike litosfernykh dvizhenij // Fizika Zemli. 1974. № 5. S. 43–54.
5. Keondzhyan V.N. Model' himiko-plotnostnoj differenciacii mantii Zemli // Fizika Zemli. 1980. № 8. S. 3–15.
6. Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A.G., Surkov A.V. Teplovaya gravitacionnaya konvekciya v astenosfere pod sredinno-okeanicheskim hrebtom i ustojchivost' osnovnykh glubinykh pargenezisov // Geologiya i geofizika. 2006. T. 47. № 1. S. 76–94.
7. Korobicyna ZH.L., Ovcharova A.S. Primenenie metoda fiktivnykh oblastej dlya zadach teplovoj konvekcii // Tr. Konf. RDAMM-2001. 2001. C. 372–382.
8. Korobicyna ZH.L., Tychkov S.A. CHislennoe modelirovanie processov teplo- i massoperenosa s uchetom fazovogo perekhoda v geodinamike // ZHVMiMF. 1997. T. 37. № 6. S. 733–741.
9. Landau L.D., Lifshic E.M. Teoreticheskaya fizika. T. VI. Gidrodinamika. M.: Fizmatlit. 2003. 736 s.
10. Lobkovskij L.I., Nikishin A.M., Hain V.E. Sovremennyye problemy geotektoniki i geodinamiki. M.: Nauchnyj mir, 2004. 612 s.
11. Monin A.N. Istoriya Zemli. L.: Nauka, 1977. 228 s.
12. Monin A.S., Sorohtin O.G. Ob ob'emnoj gravitacionnoj differenciacii Zemli // DAN SSSR. 1981. T. 259. № 5. S. 1076–1079.
13. Met'yuz Dzh., Fink K. CHislennyye metody. Ispol'zovanie MATLAB. M.: Izdatel'skij dom «Vil'yams», 2001. 720 s.
14. Oran E., Boris Dzh. CHislennoe modelirovanie reagiruyushchih potokov. M.: Mir, 1990. 660 s.
15. Prigozhin I., Kondepudi D. Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigatelej do dissipativnykh struktur. M.: Mir, 2002. 461 s.
16. Rouch P.Dzh. Vychislitel'naya gidrodinamika. M.: Mir, 1980. 618 s.
17. Rychkova E.V., Tychkov S.A. CHislennaya model' teplovoj konvekcii v verhnej mantii Zemli pod litosferoj kontinentov // Vychislitel'nye tekhnologii. 1997. T. 2. № 5. S. 66–81.
18. Samarskij A.A. Teoriya raznostnykh skhem. M.: Nauka, 1983. 616 s.

19. *Sorohtin O.G., Ushakov S.A.* Global'naya evolyuciya Zemli. M.: Izd-vo MGU, 1991. 446 s.
20. *Temam R.* Uravneniya Nav'e–Stoksa. Teoriya i chislennyj analiz. M.: Mir, 1981. 408 s.
21. *Trubicyn V.P.* Geodinamicheskaya model' evolyucii Tihogo okeana // Fizika Zemli. 2006, № 2. S. 3–25.
22. *Trubicyn V.P.* Sejsmicheskaya tomografiya i drejfk kontinentov // Fi-zika Zemli. 2008. № 12. S. 83–91.
23. *Trubicyn V.P., Baranov A.A., Evseev A.N., Trubicyn A.P., Harybin E.V.* Vliyanie nizkovyazkoj astenosfery na mantijnye techeniya // Fizika Zemli. 2006, № 12. S. 11–19.
24. *Trubicyn V.P., Nikolajchik V.V.* Rezhimy teplovoj konvekcii Zemli // Fizika Zemli. 1991. № 6. S. 3–12.
25. *Trubicyn V.P., Belavina YU.F., Rykov V.V.* Teplovoe i mekhanicheskoe vzaimodejstvie mantii s kontinental'noj litosferoj // Fizika Zemli. 1993. № 11. S. 3–15.
26. *Trubicyn V.P., Harybin E.V.* Geodinamicheskaya model' differencia-cii mantijnogo veshchestva v glubinah Zemli // Izv. AN SSSR. Fizika Zemli. 1988. № 4. S. 83–89.
27. *Tychkov S.A., Chervov V.V., Chernyh G.G.* CHislennaya model' trekhmernoj konvekcii v verhnej mantii Zemli // Fizika Zemli. 2005. № 5. S. 48–64.
28. *Uajli P.* Zemnaya mantiya // UFN. 1977. T. 121. № 1. S. 139–156.
29. *Fletcher K.* Vychislitel'nye metody v dinamike zhidkostej. M.: Mir. 1991. T. 1. 504 s.
30. *Cristensen U.* Convection with pressure- and temperature-depend non Newtonian rheology // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1984. Vol. 77. No. 2. P. 343–384.
31. *Davis T.A.* UMFPACK Version 4.6 User Guide (<http://www.cise.ufl.edu/research/sparse/umfpack>), Dept. of Computer and Information Science and Engineering, Univ. of Florida, Gainesville, FL. 2002.
32. *Gurnis M., Davies G.F.* Numerical study of high Rayleigh number convection in a medium with depth-depend viscosity // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1985. Vol. 186, No. 85. P. 523–541.
33. *Houston M.H. Jr., De Bremaecker J.Cl.* ADI solution of free convection in a variable viscosity fluid// J. of Comput. Physics. 1974. Vol. 16. P. 231–239.

34. *Lowman J.P., Jarvis G.* Mantle convection flow reversals due to continental collisions // *Geophys. Res. Lett.* 1993. Vol. 20. P. 2087–2090.

35. *McKenzie D.P., Roberts J.M., Weiss N.O.* Convection in Earth's mantle: towards a numerical simulation // *J. Fluid Mech.* 1974. Vol. 62. Part 3. P. 465–538.

36. *Schubert G., Anderson C.A.* Finite element calculation of very high Rayleigh number thermal convection // *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 1985. Vol. 80. P. 298–318.

37. *Spohn T., Schubert G.* Convective thinning of the lithosphere: a mechanism for rifting and mid-plate volcanism on Earth, Venus and Mars // *Tectonophysics.* 1983. Vol. 94. P. 67-90.

38. *Torrance K.E., Turcotte D.L.* Thermal convection with large viscosity variations // *J. Fluid Mech.* 1971. Vol. 47. P. 113–125.

39. *Turcotte D., Emerman S.* Mechanism of active and passive rifting // *Tectonophysics.* 1983. Vol. 94. P. 39–50.

40. *Zhong S., Gurnis M., Moresi L.* Free-surface formulation of mantle convection—I. Basic theory and application to plume // *Geophys. J. Int.* 1996. Vol. 127. P. 708–718.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



ЧЕТЫРБОЦКИЙ Александр Наумович – ведущий научный сотрудник Дальневосточного геологического института ДВО РАН, г. Владивосток;

Alexander CHETYRBOTSKY – leading Researcher of Far East Geological Institute (FEGI FEB RAS), Vladivostok.

e-mail: chetyrbotsky@yandex.ru

ORCID ID: 0000-0002-3982-3608

Материал поступил в редакцию 31 октября 2022 года
