

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ГИС-ОРИЕНТИРОВАННАЯ БАЗА ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА
И ПРОГНОЗА ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
НИЖНЕ-КАНСКОГО МАССИВА

© 2021 г. А. Д. Гвишиани^{a, b}, В. Н. Татарин^{a, b}, В. И. Кафган^a,
И. В. Лосев^{a, c, *}, А. И. Маневич^{a, c}

^aГеофизический центр РАН, Москва, Россия

^bИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

^cГорный институт НИТУ «МИСИС», Москва, Россия

*E-mail: i.losev@gcras.ru

Поступила в редакцию 20.07.2020 г.

В 2019 г. началось строительство подземной исследовательской лаборатории для обоснования геоэкологической безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в гранитогнейсовых породах Нижне-Канского массива (Красноярский край). Для оценки и прогноза геодинамической устойчивости тектонических блоков земной коры была создана и развивается специализированная база данных на основе ПО ESRI ArcGIS. На ее основе были систематизированы геопространственные данные многодисциплинарных исследований, включая оригинальные результаты ГНСС-наблюдений и данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В настоящее время ГИС-ориентированная база данных содержит 12 тематических информационных слоев, а также интеллектуальные алгоритмические модули анализа, реализованные на языке Python. Использование оригинальных алгоритмов системного анализа позволяет проводить интерпретацию данных ДЗЗ и оценку геодинамической опасности по различным параметрам. По результатам наблюдений за скоростями современных движений земной коры спутниковыми системами GPS/ГЛОНАСС была разработана кинематическая модель современных движений и напряженно-деформированного состояния структурных блоков Нижне-Канского массива. Проведена совместная интерпретация схемы тектонических разломов и цифровой модели рельефа SRTM-4, построенной по данным ДЗЗ, для геодинамического районирования территории Нижне-Канского массива.

Ключевые слова: база данных, геоинформационная система, геодинамика, радиоактивные отходы, ГНСС, современные движения земной коры, Нижне-Канский массив

DOI: 10.31857/S020596142101005X

ВВЕДЕНИЕ

В 2019 г. началось выполнение уникального проекта – строительство подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) для оценки и обоснования безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) в гранитогнейсовых породах Нижне-Канского массива (Красноярский край). Согласно международным и российским нормам обращения с РАО, *основным барьером*, обеспечивающим экологическую безопасность их изоляции, является *геологическая среда* (Захоронение, 2011; Андерсон и др., 2011). В современной международной практике обоснование пригодности участка земной коры для захоронения РАО строится на *системном анализе* всех возможных событий, явлений и процессов, влияющих на сохранность изоляционных свойств геологической среды. В результате такого анализа создается система доказательств без-

опасности (*Safety case*), включающая в себя базу исходных данных, характеризующих особенности строения, свойства и процессы в геологической среде (*Assessment basis*), и базу доказательств количественной оценки природных рисков (*Safety assessment*), связанных с эволюцией геологического барьера, на период радиобиологической опасности РАО, превышающий 10 тыс. лет (Захоронение, 2011; РБ-019-17, 2017; Гвишиани и др., 2019а; Татарин и др., 2019).

Практическое наполнение блоков *Assessment basis* и *Safety assessment* осуществляется путем интеграции потоков геопространственных данных в единую унифицированную среду с помощью геофизических информационных систем (ГИС), основными разработчиками которых являются компании ESRI, MapInfo, Autodesk, Intergraph, Geograph, Golden Software и др. Геодинамика использует данные исследований десятков различ-

ных научных дисциплин, в т.ч. данные ДЗЗ и ГНСС (Бондур и др., 2012; Кафтан и др., 2019; Татаринов и др., 2018; Мазуров, Кафтан, 2020). В этой связи ГИС-ориентированные базы данных (далее БД) должны быть интегрированы с модулями системного анализа, специализированными под решение той или иной задачи и позволяющими проводить интерпретацию данных, строить математические модели и визуализировать результаты исследований в виде тематических карт и т.д. (Гитис, Ермаков, 2004; Бондур и др., 2010; 2014; Гвишиани и др., 2013, 2019а; Дзедобоев, 2019; Петров и др., 2014; Красноперов, Соловьев 2015; Соловьев и др., 2018).

С 2018 г. в Геофизическом центре РАН (ГЦ РАН) реализуется проект РНФ № 18-17-00241. При его выполнении была создана БД и разработан оригинальный алгоритм оценки динамической меры устойчивости структурно-тектонических блоков земной коры (Гвишиани и др., 2019а). В 2019 г. была проведена экспедиция на Нижне-Канский массив для изучения современных движений земной коры (СДЗК) с использованием ГНСС-методов и разработаны модели напряженно-деформированного состояния массива (Морозов и др., 2008; Татаринов и др., 2019; Кафтан и др., 2019). Эта и предыдущие экспедиции, а также результаты анализа космических снимков и геоморфологических особенностей рельефа по данным радарного зондирования позволили наполнить БД новыми данными.

Создание БД состояло из следующих этапов:

- 1) выявление наиболее значимых факторов, определяющих устойчивость среды, на основе классификации опасных геологических явлений и процессов;
- 2) сбор и перевод в ГИС-формат точечных, линейных, растровых и табличных данных по геологии, тектонике, сейсмической опасности, геодинамике и др. региона;
- 3) создание единой оболочки БД для хранения разноформатных данных, а также результатов их анализа, моделирования и интерпретации;
- 4) разработка на языке *Python* алгоритмических модулей интеллектуального анализа и интерпретации геопространственных данных;
- 5) тестирование алгоритмов интеллектуального анализа на конкретных слоях БД.

КЛАССИФИКАЦИЯ ДАННЫХ

Системный анализ – это осмысление и исследование явления через изучение взаимодействия его компонентов как друг с другом (в нашем случае – свойства, явления и процессы в структурном блоке, вмещающем РАО), так и с окружающей средой (геологические, тектонические, сей-

смические и др. особенности района, радиусом до 300 км).

Методика системного анализа (Квейд, 1969) включает в себя последовательные действия при анализе информации в рамках холистического подхода, который используется в геоинформатике (Гвишиани и др., 2019а) (рис. 1):

1. *Задачи* – определение проблемы, выявление целей и границ решения, а также классификация признаков;
2. *Поиск* – создание баз данных, определение методов и средств достижения целей;
3. *Толкование* – построение различных моделей, их анализ;
4. *Реализация* – агрегирование наиболее вероятной альтернативы устойчивости структурного блока, геодинамическое районирование;
5. *Подтверждение* – экспериментальная проверка решения.

Важно подчеркнуть, что на каждом этапе исследования новые данные и новые знания о геодинамическом режиме территории последовательно интегрируются и накапливаются в БД на основе обратной связи (на рис. 1 показано пунктиром).

Разработка БД осуществлялась в рамках единой концепции, когда все геологические объекты описываются комплексом признаков в рамках целостной (холистической) сложной системы, имеющей функциональные связи как внутри себя, так и с внешней геологической средой.

Первый шаг системного анализа состоял в организации данных на основе их классификации. В геодинамике имеется достаточно большое количество подобных классификаций (Морозов, Татаринов, 1996; Батугин, 1997; Андерсон и др., 2011). На их основе с учетом задач проекта была разработана новая, включающая в себя два блока:

- а) *опасные геологические явления и процессы* (ГЯП), влияющие на устойчивость структурно-тектонического блока, вмещающего РАО;
- б) *геологические условия* возникновения и активизации опасных ГЯП.

Цель классификации заключалась в априорном выделении из весьма объемного списка геолого-геофизических данных тех параметров, которые непосредственно определяют устойчивость структурного тектонического блока, определение которого дано в (Гвишиани и др., 2019а).

Все данные были объединены в две группы. В первую входят физические характеристики пород (пределы прочности на сжатие и растяжение, модуль упругости, тепловые свойства, плотность и др.), характеристики структурной нарушенности среды и проницаемости (коэффициент структурного ослабления, коэффициент фильтрации,

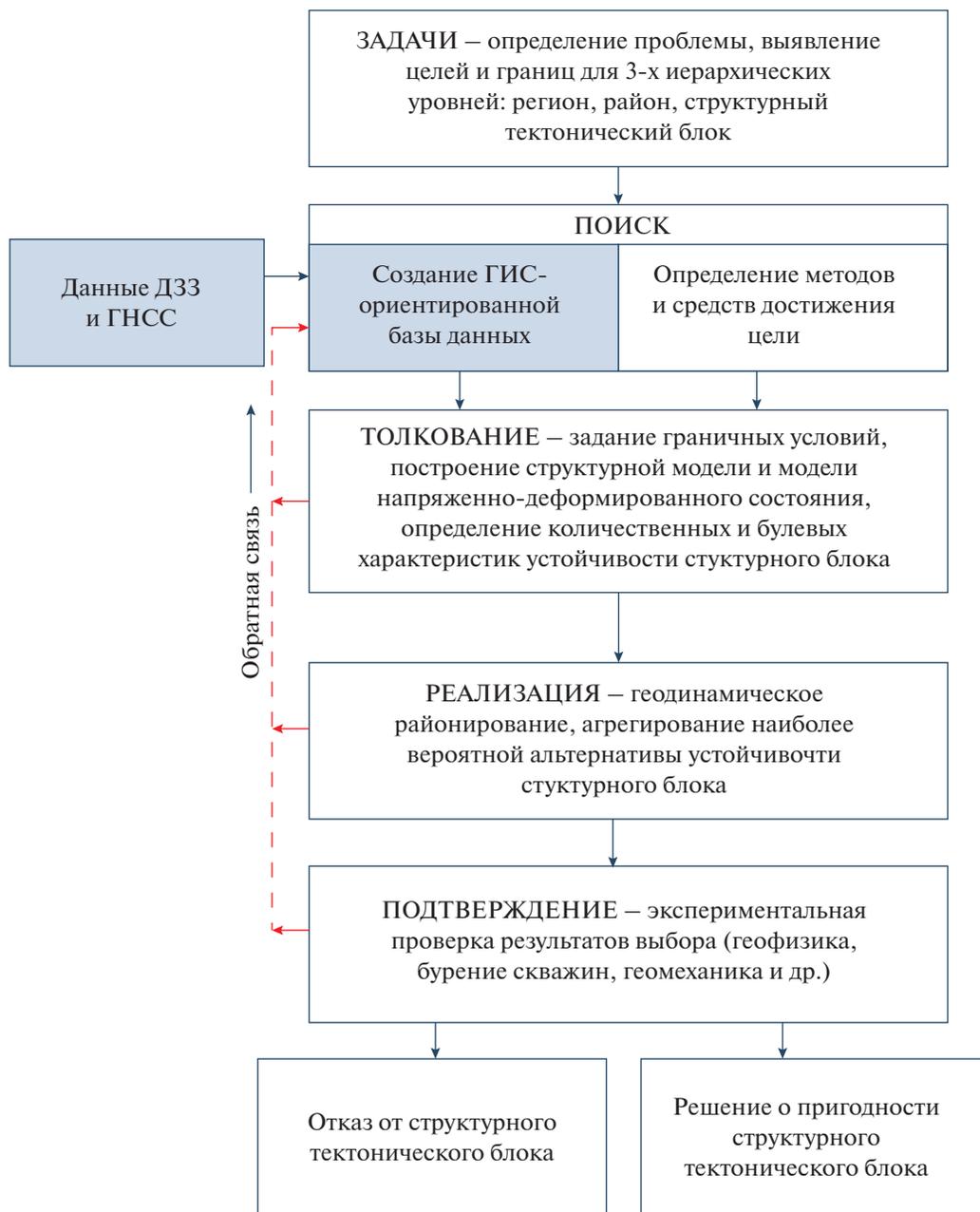


Рис. 1. Системный подход к анализу информации и место в нем ГИС-ориентированной базы данных (Гвишиани и др., 2019а).

модуль трещиноватости, плотность теплового потока, уровень грунтовых вод и т.д.).

Во вторую – геодинамические характеристики, определяющие напряженно-деформированное состояние и кинематику СТБ (напряжения, скорости горизонтальных и вертикальных СДЗК, их градиенты, скорости деформаций, геометрические характеристики тектонических разломов, каталоги сейсмических событий и др.).

Классификация ГЯП является трехуровневой – группы, виды и типы. Группа идентифицирует

ГЯП, указывает на его принадлежность к определенному семейству геологических явлений и процессов. Всего были выделены пять групп ГЯП, влияющих на геодинамическую устойчивость тектонического блока, вмещающего РАО:

1. Сейсмические события;
2. Тектонические движения земной коры;
3. Структурная нарушенность геологической среды;
4. Гидрогеологические и гидрологические явления и процессы;

5. Экзогенные геодинамические явления и процессы.

Классификация геологических условий также является трехуровневой. Было выделено шесть групп геологических условий:

1. Общегеологические и структурно-тектонические условия;
2. Геоморфологические условия;
3. Инженерно-геологические, гидрогеологические, гидрологические условия;
4. Геофизические поля;
5. Физико-механические свойства горных пород;
6. Условия, определяемые техногенным воздействием подземного сооружения.

СОСТАВ БАЗЫ ДАННЫХ

На данный момент БД представляет собой настольное приложение, рабочая оболочка которого реализована в среде ESRI ArcGIS for Desktop (Системный, 2015), и модули анализа, написанные на языке Python. Данные хранятся преимущественно в виде ESRI шейп-файлов (ESRI shapefile, 1998), растровых изображений с геопривязкой, таблиц, карт, отчетов и т.д. При создании БД использовались информационные ресурсы, ранее созданные в ГЦ РАН (База, 2014; База, 2016).

Вся информация разделена на 3 категории: 1) данные, полученные из открытых источников (карты, космические снимки, отчеты, статьи, публикации и т.д.); 2) данные, которые были получены нами путем прямых измерений, включая ГНСС-данные; 3) данные как результат системного анализа, геолого-геофизической интерпретации и математического моделирования (Гвишиани и др., 2019а). Общий объем данных составляет 8.7 Гб.

Основа БД включает в себя следующий набор цифровых тематических слоев:

1. Географическая основа района;
2. Спутниковые снимки района (ArcGIS World Imagery, 2018);
3. Цифровая модель рельефа по данным радарной интерферометрической съемки поверхности Земли – *Shuttle radar topographic mission* (SRTM-4);
4. Карта линейных элементов масштаба 1 : 200 000 (архивные данные, А.П. Лопатин, 1993);
5. Схема неотектонических структур зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты (Лобацкая, 2005);
6. Карты активных тектонических разломов и зон (архивные данные);
7. Геологическая карта Нижнеканского массива, масштаб 1 : 200 000 (Морозов и др., 2019);

8. Геологическая карта участка Енисейский масштаба 1 : 10000 (Морозов и др., 2019);

9. Каталог эпицентров землетрясений в регионе (Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии, СКЗ/SECNE);

10. Кинематическая модель современных горизонтальных движений и скоростей деформаций земной коры по данным ГНСС-мониторинга (Гвишиани и др. 2020);

11. Карты полей напряжений Нижнеканского массива, построенные по результатам моделирования методом конечных элементов (Андерсон и др., 2011);

12. Карты результатов расчета динамических показателей устойчивости района (Гвишиани и др., 2019а).

Ниже приведено краткое описание слоев. Географическая основа региона включает стандартную физическую и топографическую базовые карты, границы стран, субъектов, населенные пункты и дорожную сеть.

В БД включены космические снимки региона, полученные из открытой коллекции ArcGIS World Imagery (ArcGIS World Imagery, 2018). Она представляет собой библиотеку совмещенных снимков, выполненных группировкой космических аппаратов известных компаний, например DigitalGlobe, которые получают снимки земной поверхности с пространственным разрешением от 50 см до 1 м. Подробный перечень спутниковых миссий приведен в (World Imagery Map Contributors, 2018).

Также присутствует спутниковые снимки открытого доступа Google Earth и заказанные снимки у НЦ ОМЗ ОАО “Российские космические системы” с целью изучения геологической и геодинамической структуры Нижнеканского гранитоидного массива. Последние были получены с космических аппаратов “Ресурс-П” и “Канопус-В”. Снимки получены в результате сшивки микрокадров (поканально), трансформированы в картографическую проекцию по данным бортовой автоматической системы навигации на среднюю высоту с плановой точностью (СКО) не хуже 50 м, без цветосинтеза.

На рис. 2 приведен пример спутникового снимка района Красноярск и Железногорского района с наложенной схемой активных тектонических разломов (Лобацкая, 2005).

Под цифровой моделью рельефа (ЦМР) понимается цифровое представление рельефа в виде трехмерных массивов данных, образующих множество высотных отметок в узлах регулярной и нерегулярной сетки, и их координат. Различные ЦМР являются производными материалов ДЗЗ и, в связи с различными средствами их получения и методами обработки, могут сильно отличаться

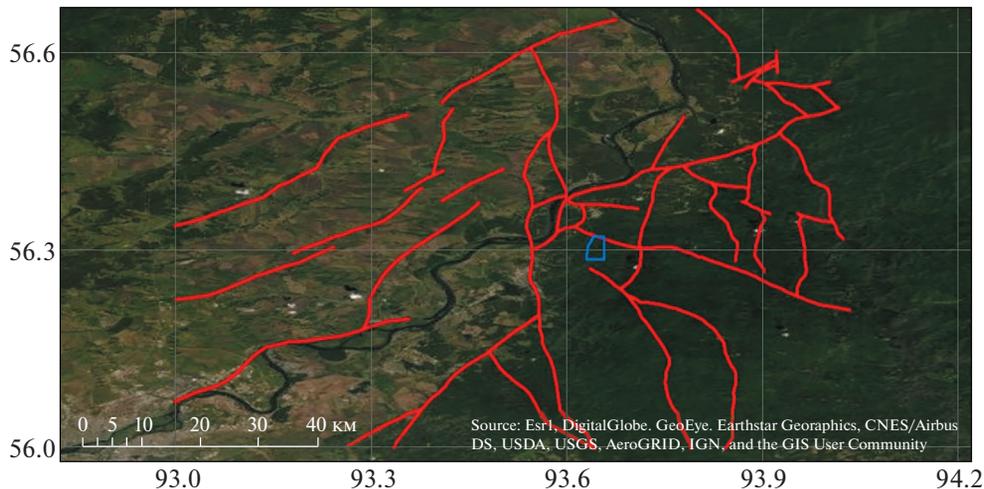


Рис. 2. Пример слоя БД: спутниковый снимок ArcGIS World Imagery района и наложенная на него схема активных тектонических разломов. Красные линии — разломы, являющиеся потенциальными зонами; синий прямоугольник — примерное расположение площадки ПИЛ.

друг от друга. На сегодняшний день наиболее востребованы модели рельефа, полученные в рамках проектов SRTM и ASTER. Цифровая модель рельефа, построенная по данным SRTM-4, представлена файлами в системе координат WGS-84/EGM96, географически соответствующими одной эллипсоидальной трапеции размером 1×1 градуса и структурно представляет собой матрицу с шагом сетки 3×3 угловых секунды дуги для SRTM DEM и 1×1 угловых секунды, разрешением 90 и 25 м.

На рис. 3 показан фрагмент ЦМР района. На ней четко видны его основные геоморфологические особенности: крупные линейные структуры — Атамановский отрог Енисейского кряжа и долина р. Кан, ориентированные под азимутом, близким к 150° . Остальные структуры более мелкого порядка имеют подчиненное им значение и также имеют субмеридиональное простирание. Выделяется также ряд мелких линеаментов. На изучение сейсмического режима подобных структур, которые могут быть зонами возможных очагов землетрясений (ВОЗ), направлены инструментальные измерения в настоящее время.

Тематические слои 4–6 характеризуют структурные нарушения земной коры и линейно вытянутые зоны, которые также могут быть зонами активных разломов. Слои 4 и 5 содержат информацию, на основе которой выделяются границы сочленения структурных тектонических блоков земной коры, в том числе подтвержденные инструментальными данными. Эти границы выделяются также по геоморфологическим особенностям ЦМР (линейность, изрезанность, изменчивость и др.), которые отличаются от “фонового” рельефа, и традиционными методами морфо-

структурного анализа. При выделении таких зон также широко используются данные аэрофото съемки, ДЗЗ различного разрешения (Геопортал, 2020) и ЦМР.

Выделяемые на космических снимках тектонические блоки рассматриваются как консолидированные элементы верхней части земной коры, а их границы, в особенности узлы пересечения границ блоков различных рангов — как *места повышенной геодинамической опасности*. В районах без маскирующего рыхлого осадочного чехла практическое выявление разломов, в т.ч. активных, не вызывает затруднений. Сложнее там, где прямые доказательства наличия разлома отсутствуют. Поэтому используют косвенные признаки: линейные аномалии рельефа, коленообразные изгибы речных долин и др. Эти аномалии, выделяемые на космоснимках, называют также *линеаментами*. В БД представлена карта линеаментов региона масштаба $1 : 200\,000$ из (База данных, 2014). Считается, что линеаменты связаны с глубинными разломами в земной коре, а эпицентры землетрясений приурочены к участкам их сочленений (Бондур и др., 2012; Гвишиани и др., 2013; Бусыгин, Никулин, 2016).

В следующем элементе БД (слой 5) содержится схема неотектонических структур зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты из (Лобацкая, 2005).

Тематические слои 7, 8, представлены геологической картой Нижнеканского массива в масштабе $1 : 200\,000$ и геологической картой участка Енисейский масштаба $1 : 10\,000$ (Морозов, 2019).

Слой 9 содержит пространственное распределение сейсмических событий из специализированного каталога землетрясений Северной Евра-

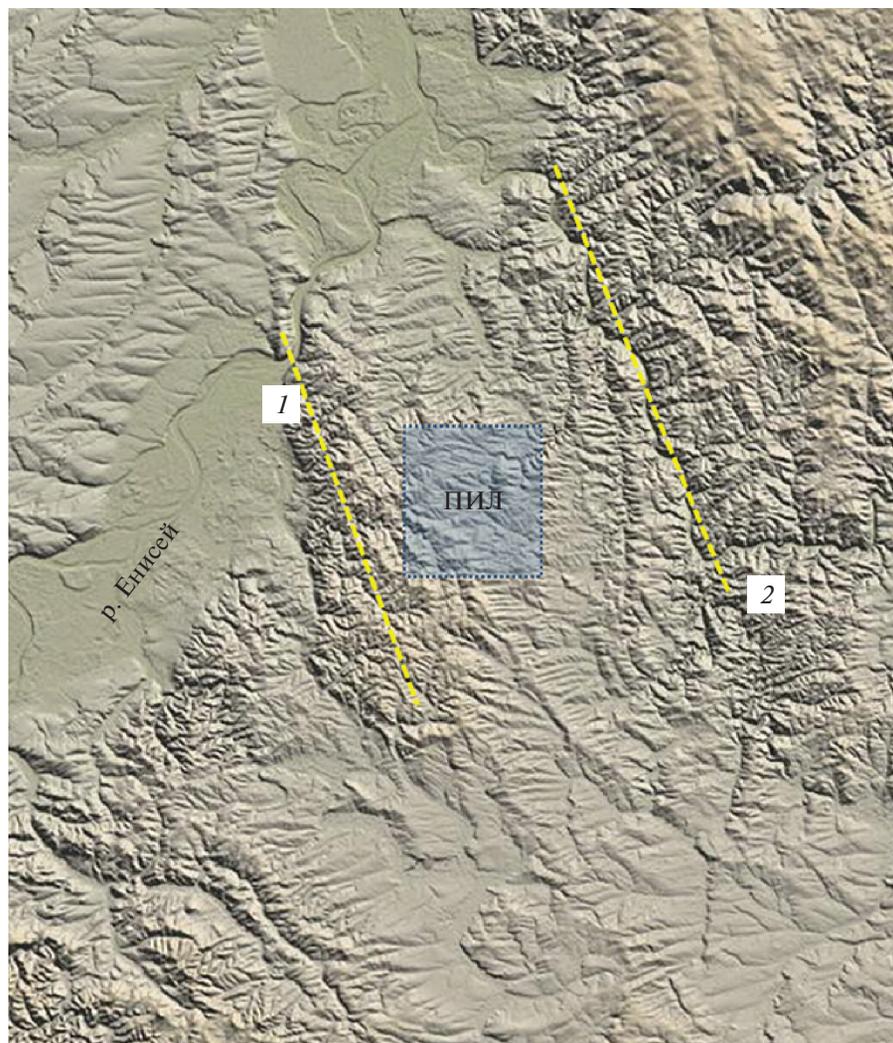


Рис. 3. Цифровая модель рельефа по данным SRTM-4. Серый квадрат участок строительства ПИЛ. Желтым пунктиром показаны главные геоморфологические линейные формы: 1 – Атамановский отрог Енисейского кряжа; 2 – долина р. Кан.

зии (СКЗ/SECNE). В БД также представлены оцифрованные карты общего сейсмического районирования для региона ОСП-2016 и карта мест возможного возникновения сильных землетрясений для Алтай–Саяны–Прибайкалья (Дзедобев и др., 2019). На рис. 4 продемонстрирован пример запроса распределения эпицентров землетрясений из каталога БД.

Слои 10, 11, 12, являются результатами моделирования и геодинамической интерпретации данных. Они содержат модель современных горизонтальных движений и деформаций земной коры по данным ГНСС-мониторинга (Гвишиани и др., 2020); карту полей напряжений, построенную по результатам моделирования методом конечных элементов (Morozov et al., 2019); карту результатов расчета динамических показателей устойчивости района (Гвишиани, 2019а).

В результате проведенных ГНСС-измерений на территории Нижнеканского массива в 2010–2019 гг. были получены векторы смещений и скорости деформаций земной поверхности (слой 10). Методические подходы и алгоритмы обработки результатов измерений описаны в работах (Гвишиани и др., 2019; Кафтан и др., 2019). В базе данных представлены временные ряды смещений и среднегодовые скорости движений для 30 ГНСС-пунктов геодинамического полигона (Гвишиани и др., 2020), а также модель поля скоростей движений и деформации базовых линий между пунктами.

На основе математического моделирования напряженно-деформированного состояния района Нижне-Канского массива авторами были получены распределения компонент тензора напряжений (слой 11). Метод моделирования НДС подробно изложен в работе (Андерсон и др., 2011).

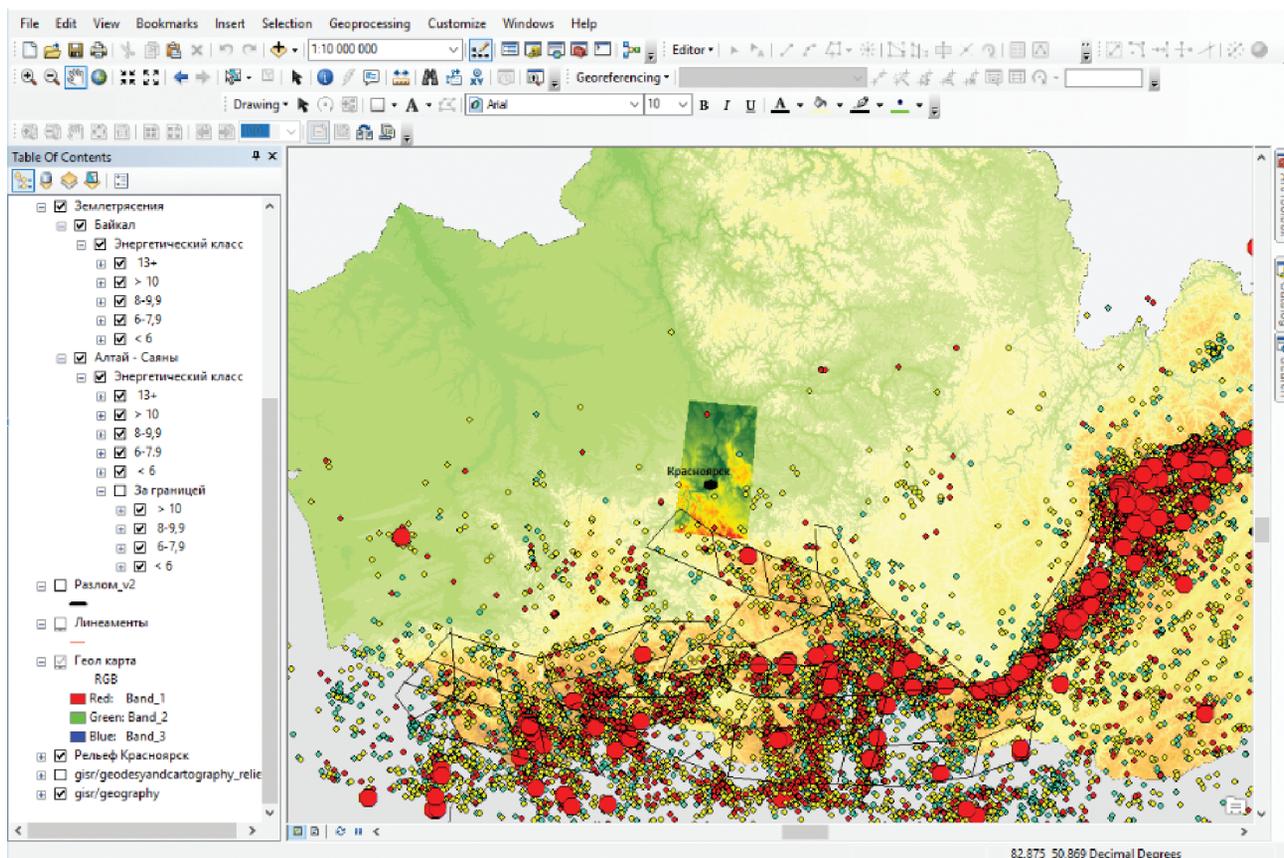


Рис. 4. Вариант запроса эпицентров землетрясений из специализированного каталога землетрясений Северной Евразии, СКЗ/SECNE (Дзедобов, 2019).

Последний слой отображает карту интегральной меры геодинамической безопасности района и участка строительства ПИЛ, полученной в результате системного анализа предыдущих слоев (Гвишиани, 2019а).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ БЛОКОВ

В настоящее время в рамках проекта РНФ разрабатывается методология системного анализа и прогноза *устойчивости структурно-тектонических блоков земной коры*, подверженных внешнему геодинамическому воздействию. Под устойчивостью понимается способность тектонического блока при внешних природных и техногенных воздействиях сохранять или изменять свои свойства и состояние в таком диапазоне, который не приведет к выходу радионуклидов за пределы санитарно-защитной зоны на весь период радиобиологической опасности РАО (Татаринов и др., 2014). Важная роль в данной методологии отводится получению новых знаний из описанной

выше БД с использованием модулей интеллектуального анализа данных. Проиллюстрируем это двумя примерами.

Первый касается выделения активных тектонических нарушений в пределах Нижне-Канско-го массива по данным ГНСС-наблюдений. Его территория с конца плиоцена (1.5 ± 0.5 млн лет) испытывает медленное воздымание в условиях относительно спокойного тектонического режима. Суммарная амплитуда поднятия за этот период оценивается в 400–500 м (Андерсон, 2011; Кочкин и др., 2017). Для оценки степени подвижности структурных блоков с 2010 по 2019 гг. проводились ГНСС-наблюдения за горизонтальными движениями земной коры (СДЗК) (Татаринов и др., 2018). Использование оригинальной методики уравнивания спутниковых измерений (Кафтан и др., 2019) и технологии ГНСС-мониторинга на локальных геодинамических полигонах позволили определить среднегодовые скорости горизонтальных СДЗК с ошибкой не более 2–3 мм. На основе этих данных была построена кинематическая модель региона (Гвишиани и др., 2020).

На рис. 5 показано поле скоростей горизонтальных СДЗК и результат их тектонической ин-

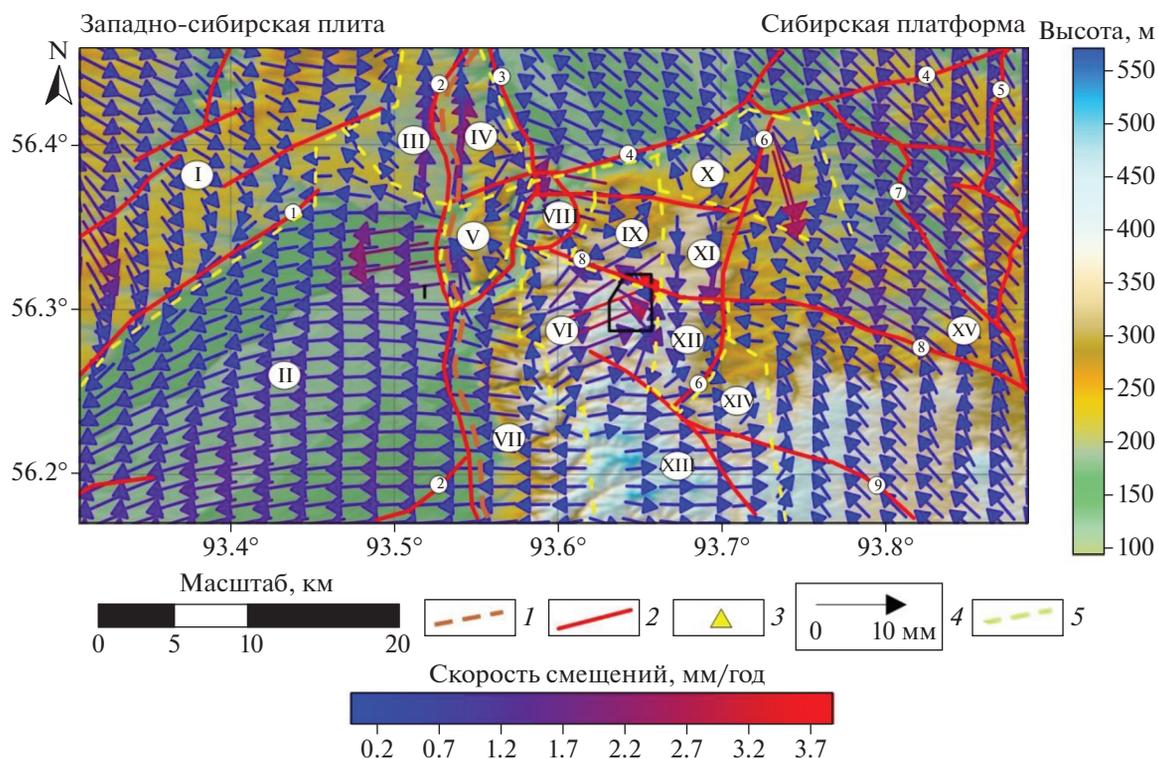


Рис. 5. Поле скоростей горизонтальных движений земной коры и тектонические блоки. 1 – граница контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты; 2 – крупные тектонические разломы; 3 – ГНСС-пункты; 4 – векторы скоростей СДЗК ГНСС-пунктов, мм/год; 5 – границы структурных блоков с различными кинематическими характеристиками. Цифрами обозначены тектонические разломы: 1 – Первый Красноярский; 2 – Муратовский; 3 – Атамановский; 4 – Канско-Атамановский; 5 – Малотельский; 6 – Правобережный; 7 – Большетельский; 8 – Шумихинский; 9 – Байкальский. Место ПИЛ показано прямоугольником. Латинскими цифрами обозначены тектонические блоки, выделенные по данным ГНСС-наблюдений.

терпретации. По направленности горизонтальных СДЗК район был поделен на 15 структурных блоков, границами которых в большинстве случаев служат выделенные ранее геологами крупные тектонические разломы (Андерсон и др., 2011).

Движения в центральной и северной частях зоны контакта Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы (структурные блоки IV и V) меняют направления с субширотного на субмеридиональное, что свидетельствует о сдвиговом характере движений по Муратовскому и Атамановскому разломам (рис. 2). Этот участок является наиболее подвижным в районе. Структурные блоки VI, VIII–XI, ограниченные Канско-Атамановским (с севера) и Муратовским (с запада) разломами имеют максимальные скорости движений до 3.5 мм/год. Скорости горизонтальных СДЗК свидетельствуют о современной тектонической активности Муратовского, Атамановского, Канско-Атамановского, Правобережного и Шумихинского разломов.

В крыльях Правобережного разлома блоковые сдвиговые движения создают “уступовидную”

структуру. При этом по контакту блоков XII и IX получены максимальные градиенты горизонтальных СДЗК. Смена направлений горизонтальных движений с субширотного на субмеридиональное совпадает с Шумихинским разломом, который непосредственно пересекает участок строительства ПИЛ. Внутри выделенных тектонических блоков получены относительно невысокие скорости горизонтальных СДЗК.

Второй пример иллюстрирует тестирование алгоритма выявления геоморфологических особенностей рельефа (которые могут быть связаны с опасными геодинамическими зонами) по ЦМР. Рельеф сформирован геодинамическими процессами, протекающими в новейшее время (с конца неогена) (Николаев, 1988). В нем проявляются как явно выраженные, так и скрытые признаки новейших движений. Исходная информация о них может быть получена различными способами (аэрофото- и космические снимки в различных диапазонах, геофизика, геодезия и т.д.). В последнее десятилетие достоверную информацию в отношении активных (новейших) разломов дает интерпретация данных радарной интерферомет-

рической съемки поверхности Земли, в т.ч. осуществленной в 2000 г. с борта космического корабля многоразового использования “Шаттл” (SRTM-4). Двумя радиолокационными сенсорами SIR-C и X-SAR было собрано 12×10^{12} байт данных по территории суши от 60° с.ш. до 54° ю.ш., в результате обработки которых получена указанная матрица высот в виде цифровой модели рельефа для 85% поверхности Земли.

Структурный блок, формирующий современные формы рельефа, рассматривается как элемент динамической активной системы, имеющей внутренние и внешние источники энергии, определяющие пространственно-временную эволюцию земной поверхности. Поэтому важно было не только определить местоположение аномальных зон, но и провести ранжирование блоков земной коры по их устойчивости, выделив наиболее пригодные для захоронения РАО.

Для этого был создан алгоритм расчета интегральной меры безопасности $S_{E_F}(w)$, структурного блока (СТБ) детально описанный в работе (Гвишиани и др., 2019а). Для практической реализации разработан программный модуль, который был протестирован для территории радиусом 30 км от ПИЛ на основе показателей, характеризующих особенности ЦМР, $-L_{Re}^1, L_{Re}^2, |\nabla_{Re}|$. Первые два показателя $-L_{Re}^1, L_{Re}^2$ характеризуют изменчивость рельефа, а третий $-|\nabla_{Re}|$ характеризует градиент рельефа. На рис. 6 приведена блок-схема расчета (Гвишиани и др., 2019а).

Мера безопасности (Гвишиани и др., 2019а) $-S_{E_F}(w)$, рассчитанная по 4 слоям, показана на рис. 7. Красный цвет соответствует устойчивому состоянию, синий – неустойчивому.

Таблица 1. Критерии $S_{E_F}(w)$ для геодинамического районирования

| Кластер w | Мера геодинамической безопасности S_{E_F} |
|-------------|---|
| Опасен | ≤ 0.25 |
| Нейтрален | $\in (0.25; 0.75)$ |
| Безопасен | ≥ 0.75 |

В терминах геодинамического районирования критерии оценки $S_{E_F}(w)$ по системе признаков F выглядят следующим образом (табл. 1).

В итоге район (рис. 7) по степени устойчивости был ранжирован на 3 категории:

а) неустойчивые участки $S_{E_F}(w) \leq 0.25$ – это преимущественно зоны разломов и там, где имеются резкие градиенты высот в зоне динамической активности разломов;

б) промежуточные участки – переходные зоны. В большинстве случаев это участки, где один из параметров $S_{E_F}(w) \in (0.25; 0.75)$;

в) устойчивые участки $S_{E_F}(w) \geq 0.75$ – это в основном равнинные участки на левом берегу р. Енисей и зоны в центре крупных структурных блоков.

Большая часть площадки строительства ПИЛ (показан на рис. 6 большой трапецией) находится в промежуточной зоне. Однако в его пределах имеются неустойчивые зоны (синий цвет) $S_{E_F}(w) \leq 0.25$, расположенные в окрестностях тектонических разломов. В то же время горный отвод под строительство объекта (на рис. 7 это внутренний пря-

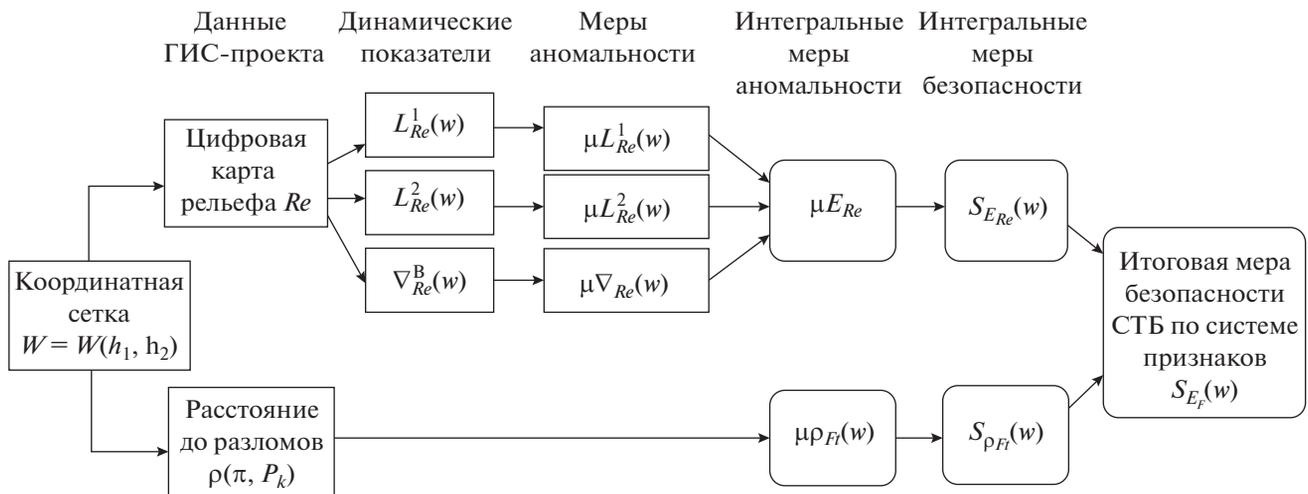


Рис. 6. Блок-схема расчета интегральной меры безопасности $S_{E_F}(w)$.

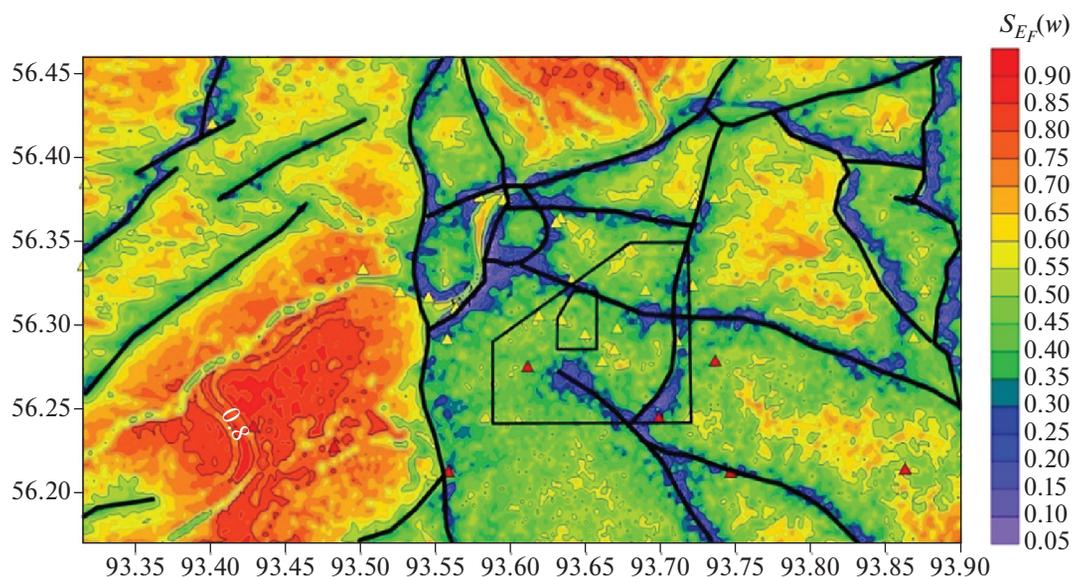


Рис. 7. Интегральная мера геодинамической безопасности $S_{E_F}(w)$ для района и участка захоронения РАО строительства ПИЛ.

моугольник) попадает в относительно устойчивую зону.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная в ГЦ РАН ГИС-ориентированная база данных по Нижне-Канскому массиву содержит как первичные данные различной тематики (геология, геофизика, ДЗЗ, сейсмология, ГНСС, рельеф и др.), так и данные, полученные в результате системного анализа исходной информации, математических моделей и их геодинамической интерпретации. Модули системного анализа дают возможность проводить многовариантный анализ тематических геоинформационных слоев, созданных как на основе оригинальных алгоритмов дискретного математического анализа, так и на базе классических подходов.

При этом реализована возможность построения математических моделей и представления результатов исследований в виде тематических карт, отражающих результаты многовариантной оценки опасности дестабилизации геологической среды под воздействием отдельных факторов, а также ранжирования структурных тектонических блоков по интегральной мере геодинамической безопасности.

Результаты анализа ЦМР, космоснимков и ГНСС-данных подтвердили перспективность применения методов ДЗЗ и ГНСС для количественной оценки природных опасностей, включая обнаружение или подтверждение существующих геодинамических зон и зон возможных очагов землетрясений. По результатам наблюдений

за скоростями современных движений земной коры спутниковыми системами GPS/ГЛОНАСС были оцифрованы крупные тектонические блоки, отличающиеся генеральным направлением современных горизонтальных движений. На этой основе разработана модель напряженно-деформированного состояния породного массива Нижне-Канского массива. Проведена совместная интерпретация схемы тектонических разломов и цифровой модели рельефа SRTM-4 для геодинамического районирования и построена карта интегральной меры геодинамической безопасности района.

Представленные примеры демонстрируют потенциальные возможности БД для построения моделей и решения различных задач оценки и прогноза геодинамической устойчивости геологической среды. Тестирование алгоритмов свидетельствует о высокой эффективности разработанной методологии системного анализа устойчивости структурных тектонических блоков земной коры в приложении к проблеме обеспечения безопасного захоронения высокоактивных РАО.

Окончательные выводы и рекомендации по геодинамической устойчивости площадки расположения пункта захоронения РАО могут быть сделаны только после окончания комплексных наблюдений в ПИЛ (ориентировочно по 2030 г.) и накопления представительных рядов результатов ГНСС-наблюдений, т.к. их величины лишь незначительно превышают заявленную ошибку метода.

В дальнейшем планируется пополнение БД новыми слоями геопространственных данных, получение новых геоинформационных моделей района на основе алгоритма DPS (Discrete Perfect Sets) (Гвишиани и др., 2019б), а также создание онлайн версии БД с централизованным хранилищем данных на серверах, что даст возможность многопользовательского доступа к базе данных и модулям их анализа и обработки.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-17-00241).

В работе использовалось оборудование и материалы, предоставленные ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” Геофизического центра РАН (<http://ckp.gcras.ru/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андерсон Е.Б., Белов С.В., Камнев Е.Н. и др.* Подземная изоляция радиоактивных отходов. М.: Издательство “Горная книга”, 2011. 592 с.
- База данных по геологической среде Нижнеканского массива (Красноярский край) “Datadase on geological environment НКМ”. Каган А.И., Морозов В.Н., Татарин В.Н. Авт. св. № 2014621299 от 15.09.2014.
- База данных по современным движениям земной коры в пределах Нижнеканского массива, полученная по данным наблюдений ГНСС “Data on modern geodynamic movements”. Татарин В.Н., Кафтан В.И., Морозов В.Н., Маневич А.И., Татарин Т.А. Авт. св. № 2016620856 от 27.06.2016.
- Батугин А.С.* Классификация участков земной коры по степени геодинамической опасности // Методика и техника ведения маркшейдерских и геологических работ на шахтах и разрезах. СПб.: ВНИМИ, 1997. С. 206–213.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеamentного анализа космических изображений // Докл. АН. 2005. Т. 402. № 1. С. 98–105.
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В.* Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // Докл. АН. 2010. Т. 430. № 3. С. 400–404.
- Бусыгин Б.С., Никулин С.Л.* Связь линеamentов космических снимков и эпицентров землетрясений в пределах Байкальской рифтовой зоны // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 219–230.
- Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Агаян С.М.* О новом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе // Физ. Земли. 2013. № 6. С. 747–766. <https://doi.org/10.7868/S0002333713060045>
- Гвишиани А.Д., Кафтан В.И., Красноперов Р.И., Татарин В.Н.* Геоинформатика и системный анализ в геофизике и геодинамике // Физ. Земли. 2019а. № 1. С. 2–60. <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019142-60>
- Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р.* Исследование систем действительных функций на двумерных сетках с использованием нечетких множеств // Чебышевский сборник. 2019б. Т. 20. № 1. С. 94–111. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2019-20-1>
- Геопортал Роскосмоса. Сервис космических снимков. URL: <http://gptl.ru/>
- Гитис В.Г., Ермаков Б.В.* Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике. Физматлит. М. 2004. 256 с.
- Дзобоев Б.А., Гвишиани А.Д., Белов И.О., Агаян С.М., Татарин В.Н., Барыкина Ю.В.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе алгоритма с единственным чистым классом обучения: I. Алтай–Саяны–Прибайкалье. М ≥ 6.0 // Физ. Земли. 2019. № 4. С. 33–47.
- Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности № SSR-5. Нормы МАГАТЭ по безопасности, МАГАТЭ. Вена, 2011.
- Кафтан В.И., Гвишиани А.Д., Морозов В.Н., Татарин В.Н.* Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019. № 1. С. 83–94. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-83-94>
- Квейд Э.* Анализ сложных систем / Под ред. И.И. Андреева, И.М. Верещагина. М.: Советское радио, 1969. 520 с.
- Кочкин Б.Т., Мальковский В.И., Юдинцев С.В.* Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). М.: ИГЕМ РАН, 2017. 384 с.
- Красноперов Р.И., Соловьев А.А.* Аналитическая геоинформационная система для комплексных геолого-геофизических исследований на территории России // Горный журн. 2015. № 10. С. 89–93. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.10.16.Б-019-17>
- Лобацкая Р.М.* Неотектоническая разломно-блоковая структура зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 2. С. 141–150.
- Мазуров Б.Т., Кафтан В.И.* Обзор развития геодинамики и геодезических методов решения геодинамических задач // Геодезия и картография. 2020. № 2. С. 25–39. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-956-2-25-39>
- Морозов В.Н., Татарин В.Н.* Методика выбора участков земной коры для размещения экологически опасных отходов // Геоэкология М. 1996. № 6. С. 109–120.
- Морозов О.А., Расторгуев А.В., Неуважаев Г.Д.* Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2019. № 4(9). С. 46–62. <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2019-4-46-62>
- Николаев Н.И.* Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М.: Недра. 1988. 491 с.
- Петров В.А., Веселовский А.В., Кузьмина Д.А.* Моделирование и мониторинг геодинамической обстановки с

помощью геоинформационной системы // Научное обозрение. 2014. № 8. С. 133–138. ISSN: 1815-4972.

РБ-019-17. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях. М.: Ростехнадзор, 2017.

Системный анализ и математическое моделирование сложных экологических и экономических систем. Теоретические основы и приложения. Отв. ред. Ф.А. Сурков, В.В. Селютин. Изд-во Южного федерального университета, 2015. 162 с.

Соловьев А.А., Соловьев Ал. А., Гвишиани А.Д., Николова Ю.И., Николов Б.П. ГИС-ориентированная база данных по оценке сейсмической опасности для регионов Кавказа и Крыма // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 5. С. 52–64.

<https://doi.org/10.31857/S020596140003241-6>

Татаринов В.Н. и др. Устойчивость геологической среды как основа безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива // Надежность и безопасность энергетики. 2014. № 1(24). С. 25–29.

Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И. Современная геодинамика южной части Енисейского кряжа по результатам спутниковых наблюдений //

Геофизические исследования. 2018. Т. 19. № 4. С. 64–79. <https://doi.org/10.21455/gr2018.4-5>

Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И., Татаринова Т.А. Подземная исследовательская лаборатория: задачи геодинамических исследований // Радиоактивные отходы. 2019. № 1(6). С. 77–89.

ESRI shapefile technical description. Redlands, CA, USA: ESRI, 1998. 34 p.

Manevich A.I., Tatarinov V.N. Application of artificial neural networks for predicting modern movements of the earth's crust // Research in Geoinformatics. Proceedings of the Geophysical center of the Russian Academy of Sciences. V. 5. № 2. 2017. P. 37–47.

<https://doi.org/10.2205/2017BS045>

Morozov V.N., Belov S.V., Kolesnikov M.Yu., Tatarinov V.N., Tatarinova T.A. Possibilities of geodynamic zoning when selecting places of underground isolation of high-level radioactive waste on the example of the nizhnekansky massif // Engineering ecology. № 5. 2008. P. 17–25.

Morozov V.N., Tatarinov V.N., Manevich A.I., Losev I.V. Analogy method to determine the stress-strain state of structural-tectonic blocks of the Earth's crust for the disposal of radioactive waste // Russian J. Earth Science. 2019. № 19. P. ES6001.

<https://doi.org/10.2205/2019ES000687>

GIS-Oriented Database As Basis for System Analysis of Geodynamic Stability the Nizne-Kansky Massif

A. D. Gvishiani^{1,2}, V. N. Tatarinov^{1,2}, V. I. Kaftan¹, I. V. Losev^{1,3}, and A. I. Manevich^{1,3}

¹Geophysical Center RAS, Moscow, Russia

²Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia

³Mining Institute NUST "MISiS", Moscow, Russia

In the Krasnoyarsk region, within the Nizne-Kansky massif, the construction of an underground research laboratory was started in 2019 to justify the safety of the disposal of height-level radioactive waste. The article describes the database on the geodynamics of the Nizne-Kansky massif based on ArcGIS. The database acts as a way to systematize, structure, accumulate and systematically analyze the flows of geospatial research data, including space sounding data and GNSS observations, to predict the long-term stability of the tectonic blocks of the Earth's crust. The database contains 12 thematic layers of geological and geophysical data. The analytic component is presented in the form of data mining algorithms in Python. The GIS-oriented database has become the basis for the interpretation of GNSS data and the construction of a kinematic model of the region. An example of the practical use of algorithms for geodynamic zoning of the territory, including using data from the radar topographic survey SRTM-4, is given.

Keywords: database, geographic information system, geodynamics, GNSS, modern movements of Earth's crust, Nizne-Kansky massif, height-level radioactive waste

REFERENCES

Anderson E.B., Belov S.V., Kamnev E.N., Kolesnikov I.Yu., Lobanov N.F., Morozov V.N., Tatarinov V.N., Podzemnaya izolyaciya radioaktivnyh othodov [Underground isolation of radioactive waste]. Moscow: "Gornaya kniga", 2011. 592 p. (In Russian)

Batugin A.S. Klassifikaciya uchastkov zemnoj kory po stepeni geodinamicheskoj opasnosti [Classification of sections of the earth's crust according to the degree of geodynamic hazard] // Metodika i tekhnika vedeniya markshejderskih i

geologicheskikh rabot na shahtah i razrezah. VNIMI, S-Pb., 1997. P. 206–213 (In Russian).

Bondur V.G., Zverev A.T. Metod prognozirovaniya zemletryasenij na osnove lineamentnogo analiza kosmicheskikh izobrazhenij [A method of earthquake forecast based on the lineament analysis of satellite images] // Dokl. AN. 2005. V. 402. № 4. P. 561–567 (In Russian).

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V. Svyaz' mezhdru variacijami napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zemnoj kory i sejsmicheskoj

aktivnost'yu na primere Yuzhnoj Kalifornii [The relationship between variations of the stress-strain state of the earth's crust and seismic activity on the example of southern California] // Dokl. AN. 2010. V. 430. № 3. P. 400–404 (In Russian).

Busygin B.S., Nikulin S.L. Svyaz' lineamentov kosmicheskikh snimkov i epicentrov zemletryasenij v predelakh Bajkal'skoj riftovoj zony [Connection of lineaments of satellite images and earthquake epicenters within the Baikal rift zone]. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. V. 13. № 4. P. 219–230 (In Russian).

Database on geological environment of the nizhnekansky massif (Krasnoyarsk territory) "Database on geological environment NKM". A.I. Kagan, V.N. Morozov, V.N. Tatarinov. Auth.reduction. No. 2014621299 from 15.09.2014.

Database on modern movements of the earth's crust within the nizhnekansky massif, obtained from GNSS observations "Data on modern geodynamic movements". V.N. Tatarinov, V.I. Kaftan, V.N. Morozov, A.I. Manevich, T.A. Tatarinova. Auth. reduction. No. 2016620856 from 27.06.2016.

ESRI shapefile technical description. Redlands, CA, USA: ESRI, 1998. 34 p

Dzeboev B.A., Gvishiani A.D., Belov I.O., Agayan S.M., Tatarinov V.N., Barykina Y.V. Raspoznavanie mest vozmozhnogo vozniknoveniya sil'nyh zemletryasenij na osnove algoritma s edinstvennym chistym klassom obucheniya: I. Altaj–Sayany–Pribajkal'e. $M \geq 6.0$ [Strong-earthquake-prone areas recognition based on an algorithm with a single pure training class: I. Altai–Sayan–Baikal region, $M \geq 6.0$] // *Fizika Zemli*. 2019. T. 55. № 4. P. 563–575 (In Russian).

Gitis V.G., Ermakov B.V. Osnovy prostranstvenno-vremennogo prognozirovaniya v geoinformatike [Fundamentals of space-time forecasting in Geoinformatics]. Moscow: Fizmatlit, 2004. 256 p. (In Russian).

Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Agayan S.M. O novom podhode k raspoznavaniyu mest vozmozhnogo vozniknoveniya sil'nyh zemletryasenij na Kavkaze [On a new approach to recognizing places where strong earthquakes may occur in the Caucasus] // *Fiz. Zemli*. 2013. № 6. P. 747–766 (In Russian). DOI: 10.7868/S0002333713060045

Gvishiani A.D., Kaftan V.I., Krasnoperov R.I., Tatarinov V.N., Vavilin E.V. Geoinformatika i sistemnyj analiz v geofizike i geodinamike [Geoinformatics and systems analysis in geophysics and geodynamics] // *Fizika Zemli*. 2019a. № 1. P. 33–49 (In Russian). DOI: 10.1134/S1069351319010038

Gvishiani A.D., Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R. Issledovanie sistem dejstvitel'nyh funkcij na dvumernyh setkah s ispol'zovaniem nechetkih mnozhestv [Research of systems of real functions on two-dimensional grids using fuzzy sets] // *Chebyshevskij sbornik*. V. 20. № 1. 2019b. C. 94–111 (In Russian). DOI: 10.22405/2226-8383-2019-20-1

Kaftan V.I., Gvishiani A.D. Morozov V.N., Tatarinov V.N. Metodika i rezul'taty opredeleniya dvizhenij i deformatsij zemnoj kory po dannym GNSS na geodinamicheskom poligone v rajone zahoroneniya radioaktivnyh othodov [Methods and results of determining movements and deformations of the earth's crust based on GNSS data at a geodynamic landfill in the area of radioactive waste disposal] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya iz kosmosa*. 2019. № 1. P. 83–94 (In Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-83-94

Kochkin B.T., Malkovsky V.I., Yudinsev S.V. Nauchnye osnovy ocenki bezopasnosti geologicheskoy izolyacii dolgozhivushchih radioaktivnyh othodov (Enisejskij proekt) [Scientific bases of safety assessment of geological isolation of long-lived radioactive waste (Yenisei project)]. Moscow: IGEM RAS, 2017. 384 p. (In Russian).

Krasnoperov R.I., Soloviev A.A. Analiticheskaya geoinformacionnaya sistema dlya kompleksnyh geologo-geofizicheskikh issledovanij na territorii Rossii [Analytical geoinformation system for integrated geological-geophysical research in the territory of Russia] // *Gornyi Zhurn. (Mining J.)*. 2015. V. 10. P. 89–93 (In Russian). DOI: 10.17580/gzh.2015.10.16.B-019-17

Lobatskaya R.M. Neotektonicheskaya razlomno-blokovaya struktura zony sochleneniya Sibirskoj platformy i Zapadno-Sibirskoj plity [Neotectonic fault-block structure of the joint zone of the Siberian platform and the West Siberian plate] // *Geologiya i geofizika*. 2005. V. 46. № 2. P. 141–150 (In Russian).

Manevich A.I., Tatarinov V.N. Application of artificial neural networks for predicting modern movements of the earth's crust // *Research in Geoinformatics. Proceedings of the Geophysical center of the Russian Academy of Sciences*. 2017. V. 5. № 2. P. 37–47. DOI: 10.2205/2017BS045

Mazurov B.T., Kaftan V.I. Obzor razvitiya geodinamiki i geodezicheskikh metodov resheniya geodinamicheskikh zadach [Review of geodynamics and geodesics development methods for solving geodynamic problems] // *Geodeziya i kartografiya*. 2020. № 2. P. 25–39 (In Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2020-956-2-25-39

Morozov O.A., Rastorguev A.V., Neuvazhaev G.D. Ocenka sostoyaniya geologicheskoy sredy uchastka Enisejskij (Krasnoyarskij kraj) [Assessment of the state of the geological environment of the Yenisei (Krasnoyarsk territory) section] // *Radioaktivnye othody*. 2019. № 4(9). P. 46–62 (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62

Morozov V.N., Tatarinov V.N. Metodika vybora uchastkov zemnoj kory dlya razmeshcheniya ekologicheskii opasnyh othodov [Method of selecting areas of the earth's crust for the placement of environmentally hazardous waste] // *Geoekologiya M*. 1996. № 6. P. 109–120 (In Russian).

Morozov V.N., Belov S.V., Kolesnikov M.Yu., Tatarinov V.N., Tatarinova T.A. Possibilities of geodynamic zoning when selecting places of underground isolation of high-level radioactive waste on the example of the nizhnekansky massif // *Engineering ecology*. 2008. № 5. P. 17–25.

Morozov V.N., Tatarinov V.N., Manevich A.I., Losev I.V. Analogy method to determine the stress-strain state of structural-tectonic blocks of the Earth's crust for the disposal of radioactive waste // *Russian J. Earth Science*. 2019. № 19. ES6001. DOI: 10.2205/2019ES000687.

Nikolaev N.I. Novejshaya tektonika i geodinamika litosfery. [The newest tectonics and geodynamics of the lithosphere] Moscow: Nedra. 1988. 491 p. (In Russian).

Petrov V.A., Veselovsky A.V., Kuzmina D.A. Modelirovanie i monitoring geodinamicheskoy obstanovki s pomoshch'yu geoinformacionnoj sistemy [Modeling and monitoring of geodynamic conditions using a geoinformation system] // *Nauchnoe obozrenie* 2014. № 8. P. 133–138. ISSN: 1815-4972 (In Russian).

Quade E. Analiz slozhnyh sistem [Analysis of complex systems] / Ed. by I.I. Andreev, I.M. Vereshchagin. Moscow: Sovetskoe radio, 1969. 520 p. (In Russian).

Radioactive waste disposal. Specific security requirements No. SSR-5. IAEA safety standards, IAEA. Vienna, 2011.

The Roscosmos Geoportal. Satellite image service. URL: <http://gptl.ru/>

RB-019-17. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoj energii. Ocenka iskhodnoj sejsmichnosti rajona i ploshchadki razmeshcheniya ob"ekta ispol'zovaniya atomnoj energii pri inzhenernyh izyskaniyah i issledovaniyah [Safety guide for the use of nuclear energy. Assessment of the initial seismicity of the area and site of the nuclear power facility during engineering surveys and research]. Moscow: Rostekhnadzor, 2017 (In Russian).

Soloviev An.A., Soloviev Al.A., Gvishiani A.D., Nikolova Yu.I., Nikolov B.P. GIS-orientirovannaya baza dannyh po ocenke sejsmicheskoy opasnosti dlya regionov Kavkaza i Kryma [GIS-oriented database on seismic hazard assessment for the Caucasus and Crimea regions] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2018. № 5. P. 52–64 (In Russian). DOI: 10.31857/S020596140003241-6

Sistemnyj analiz i matematicheskoe modelirovanie slozhnyh ekologicheskikh i ekonomicheskikh sistem. Teoreticheskie osnovy i prilozheniya [System analysis and mathematical modeling of complex environmental and economic systems.

Theoretical foundations and applications]. Resp. Eds. F.A. Surkov, V.V. Selyutin. Izdatel'stvo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2015. 162 p. (In Russian).

Tatarinov V.N. et al. Ustojchivost' geologicheskoy sredy kak osnova bezopasnoj podzemnoj izolyacii radioaktivnyh othodov i otrabotavshego yadernogo topliva [Stability of the geological environment as the basis for safe underground isolation of radioactive waste and spent nuclear fuel] // *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2014. № 1(24). P. 25–29. (In Russian).

Tatarinov V.N., Morozov V.N., Kaftan V.I., Manevich A.I. Sovremennaya geodinamika yuzhnoj chasti Enisejskogo kryazha po rezul'tatam sputnikovyyh nablyudenij [Modern geodynamics of the southern part of the Yenisei ridge based on satellite observations] // *Geofizicheskie issledovaniya*. 2018. V. 19. № 4. P. 64–79 (In Russian). DOI: 10.21455/gr2018.4-5

Tatarinov V.N., Morozov V.N., Kaftan V.I., Manevich A.I., Tatarinova T.A. Podzemnaya issledovatel'skaya laboratoriya: zadachi geodinamicheskikh issledovaniy [Underground research laboratory: problems of geodynamic research] // *Radioaktivnye othody*. 2019. № 1(6). P. 77–89 (In Russian).