

## ГЕОИНФОРМАТИКА И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ В ГЕОФИЗИКЕ И ГЕОДИНАМИКЕ

© 2019 г. А. Д. Гвишиани<sup>1,2\*</sup>, В. И. Кафтан<sup>1,3\*\*</sup>, Р. И. Красноперов<sup>1\*\*\*</sup>,  
В. Н. Татаринов<sup>1,2\*\*\*\*</sup>, Е. В. Вавилин<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

\*E-mail: a.gvishiani@gcras.ru

\*\*E-mail: v.kaftan@gcras.ru

\*\*\*E-mail: r.krasnoperov@gcras.ru

\*\*\*\*E-mail: v.tatarinov@gcras.ru

\*\*\*\*\*E-mail: e.vavilin@gcras.ru

Поступила в редакцию 18.06.2018 г.

Принята в печать 15.08.2018 г.

В статье рассматривается применение методов геоинформатики и системного анализа для обработки и интерпретации геопространственных данных в геофизике и геодинاميке. Описываются современные возможности наблюдений с использованием глобальных навигационных спутниковых систем как основного поставщика геопространственных данных. Представлены достижения в области интерпретации геомагнитных данных, и в связи с этим излагаются некоторые основы системного анализа. Применение системного анализа в геофизике и геодинاميке проиллюстрировано на примере подходов к решению проблемы оценки и прогноза устойчивости структурно-тектонических блоков земной коры для обеспечения геэкологически безопасного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в породах Нижне-Канского массива (Красноярский край).

*Ключевые слова:* системный анализ, геэкологически безопасное захоронение отходов, геопространственные данные

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019142-60>

### ВВЕДЕНИЕ

Геоинформатика изучает потоки геопространственных данных, потребителем которых являются геофизика и ее смежный с геологией раздел – геодинاميка. В мире, в настоящее время, накапливается беспрецедентно большой объем геопространственных данных, достигающий тысяч *йоттабайт* ( $10^{24}$  байт). Одним из главных поставщиков геопространственных данных для геофизики и геодинاميки являются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС). На протяжении уже нескольких десятилетий они обеспечивают, с огромной частотой опроса, глобальный, региональный и локальный геодинاميческий мониторинг, а также различные инженерные приложения. Многочисленные станции непрерывных ГНСС-наблюдений расположены

по всей земной поверхности. Они обеспечивают контроль за состоянием и поведением литосферы, гидросферы и атмосферы.

Важнейшим объектом исследования геофизики является магнитное поле Земли. Сегодня глобально распределенные сети обсерваторий позволяют регистрировать характеристики магнитного поля Земли с секундным временным разрешением. В статье описываются геоинформационные свойства потоков данных ГНСС и мировой сети наблюдений за магнитным полем Земли ИНТЕРМАГНЕТ. Системно-аналитический подход позволяет эффективно интегрировать и интерпретировать эти два важнейших вида данных для их совместного использования при оценке и прогнозе устойчивости геологической среды в связи с необходимостью

захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) в геологических формациях.

Важное свойство геофизических и геодинамических данных — их многопрофильность. Геофизика и геодинамика в своих исследованиях используют результаты десятков различных научных дисциплин и направлений. Такое разнообразие информации требует системного анализа при ее обработке и обобщении. В этих науках выходит на первый план распознавание знаний в исходных и обработанных данных. Тот факт, что данные становятся цифровыми, дает возможность всеобъемлющего внедрения их алгоритмической обработки. Особо важное место здесь занимает распознавание образов, являющееся неотъемлемой частью как геоинформатики, так и системного анализа.

*Системный анализ* — это научный метод познания, в котором различные процессы, протекающие в сложных системах «человек — объект — окружающая среда» описываются формальным, математическим и/или формально-логическим, языком. Системный анализ — это понимание явлений через систему взаимодействующих его компонент друг с другом и с окружающей средой. Системный анализ описывает явления в терминах системы, ее элементов, состояний элементов и взаимодействий элементов между собой и внешней средой. Вначале происходит трансформация исследуемой проблемы из прикладной области знаний в ее математический аналог, который исследуется соответствующими методами системного анализа: оптимизации, исследования операций, информатики, искусственного интеллекта, распознавания образов и знаний, вариационного исчисления, теории игр и т. д.

Системный анализ широко применяется на уровне больших корпораций и государственных структур при прогнозировании и оценке опасности взаимодействия природных и техногенных систем, включая особо ответственные техногенные объекты в земных недрах. Особо ответственные и экологически опасные подземные объекты подвержены рискам природных и техногенных катастроф.

Примером использования системного анализа при анализе геопространственных данных являются исследования в районе первого в России пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) в геологических формациях, строительство которого стартует в 2019 г. Обеспечение геоэкологической безопасности этого уникального подземного объекта тесно

связано с качеством оценки огромного объема разноплановых геолого-геофизических данных о вмещающем структурно-тектоническом блоке и окружающей территории. При этом критическим является прогноз устойчивости на срок радиобиологической опасности РАО, который превышает 10 тыс. лет. Решение этой системной проблемы входит в первоочередные мировые научные приоритеты развитых стран.

Настоящая статья посвящена связи этой проблемы с геоинформатикой и системным анализом. Системная интеграция данных наблюдений за кинематикой структурно-тектонических блоков земной коры и выявления в кристаллическом фундаменте скрытых тектонических нарушений с использованием ГНСС и геомагнитных исследований позволяет рассмотреть задачу оптимизации мест подземной изоляции радиоактивных отходов как задачу системного анализа [Гвишиани и др., 2008в; Татаринцов, 2017].

## ПРИЛОЖЕНИЯ МНОГОСИСТЕМНЫХ ГНСС В ГЕОФИЗИКЕ И ГЕОДИНАМИКЕ

Исходной областью применения ГНСС в геофизических и геодинамических исследованиях стало определение количественных характеристик современных движений земной коры. Повторные, многократные и непрерывные геодезические измерения на протяжении столетия поставляют важные исходные данные для таких геофизических и геодинамических научных дисциплин как сейсмология, вулканология, океанология, геотектоника. ГНСС, в отличие от традиционных геодезических измерений, позволили получать оценки изменений пространственного положения пунктов земной поверхности с непревзойденной точностью, временной регулярностью и частотой опроса.

Благодаря совместному использованию систем ГЛОНАСС и GPS [Кафтан и др., 2017] получение оценок смещений пунктов земной поверхности в сетях локального геодинамического мониторинга сегодня осуществляется с точностью до первых миллиметров. В наблюдательных сетях глобального распределения совместное использование многосистемных ГНСС (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, Beidou) при взаимном удалении наблюдательных станций на сотни и тысячи километров друг от друга позволяет достигать субсантиметровые и близкие к миллиметровой точности.

Это обеспечивает высокую объективность и надежность исследования современных

движений земной коры. Соответствующее определение скорости деформаций среды в районах расположения особо ответственных техногенных объектов (атомные станции, гидростанции, пункты хранения радиоактивных отходов и др.) позволяет разрабатывать теоретические и прикладные модели таких процессов, как подготовка, разрядка и релаксация напряжений в областях землетрясений; инфляция и дефляция магматических очагов в вулканических районах; развитие разрушения пород в динамической форме и обрушений при добыче полезных ископаемых и др. Последнее делает многосистемные ГНСС важнейшим современным инструментом геофизических исследований.

Современный охват Земной суши непрерывными ГНСС-наблюдениями составляет немногим менее 17 тыс. пунктов. Временная дискретность регистрации их пространственных положений варьирует от одного раза в сутки, при регистрации относительно медленных коровых движений, до 100 Герц, при решении задач сейсмологии, определения быстрых движений в очагах землетрясений и тектонического тремора. Многие из ГНСС-станций функционируют непрерывно уже более 20 лет, обеспечивая важной информацией геофизические исследования [Vock et al., 2016].

Благодаря исходным ГНСС-данным в настоящее время получены объективные и достоверные оценки скоростей и нелинейных вариаций движений тектонических плит в глобальной координатной системе отсчета [Altamimi et al., 2016]. Российская академия наук поддерживает Деформационную сеть Северной Евразии [Steblov, Starovoit, 2002]. Деформационные предвестники сильных коровых землетрясений активно исследуются на основе анализа данных ГНСС [Kaftan, Melnikov, 2017; Кафтан, Мельников, 2018]. Восемилетние ГНСС-наблюдения с суточным временным интервалом в районе залива Сан-Франциско (США) позволили отследить развитие интенсивных сдвиговых деформаций задолго до крупного землетрясения Напа (2014 г.,  $M=6.1$ ). Это свидетельствует в пользу реальности возникновения деформационных предвестников перед крупными землетрясениями (рис. 1).

Горизонтальные деформации вычисляются для треугольников триангуляции Делоне. Для вычисления деформаций конечного элемента использовался тензор деформации:

$$T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_n & \varepsilon_{ne} \\ \varepsilon_{en} & \varepsilon_e \end{pmatrix}, \quad (1)$$

элементами которого являлись  $\varepsilon_n = \frac{\partial u_n}{\partial n}$ ,  $\varepsilon_e = \frac{\partial u_e}{\partial e}$  и  $\varepsilon_{en} = \varepsilon_{ne} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n} \right)$ , соответственно, где:  $\frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n} = \gamma_{ne} = \gamma_{en}$  – деформация сдвига;  $u_n$  и  $u_e$  – смещения по осям координат  $n$  и  $e$ .

С целью исследования пространственно-временного распределения горизонтальных деформаций использованы следующие инвариантные характеристики:

1) главные деформации  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ :

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2} \left[ \varepsilon_n + \varepsilon_e \pm \sqrt{(\varepsilon_n - \varepsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2} \right], \quad (2)$$

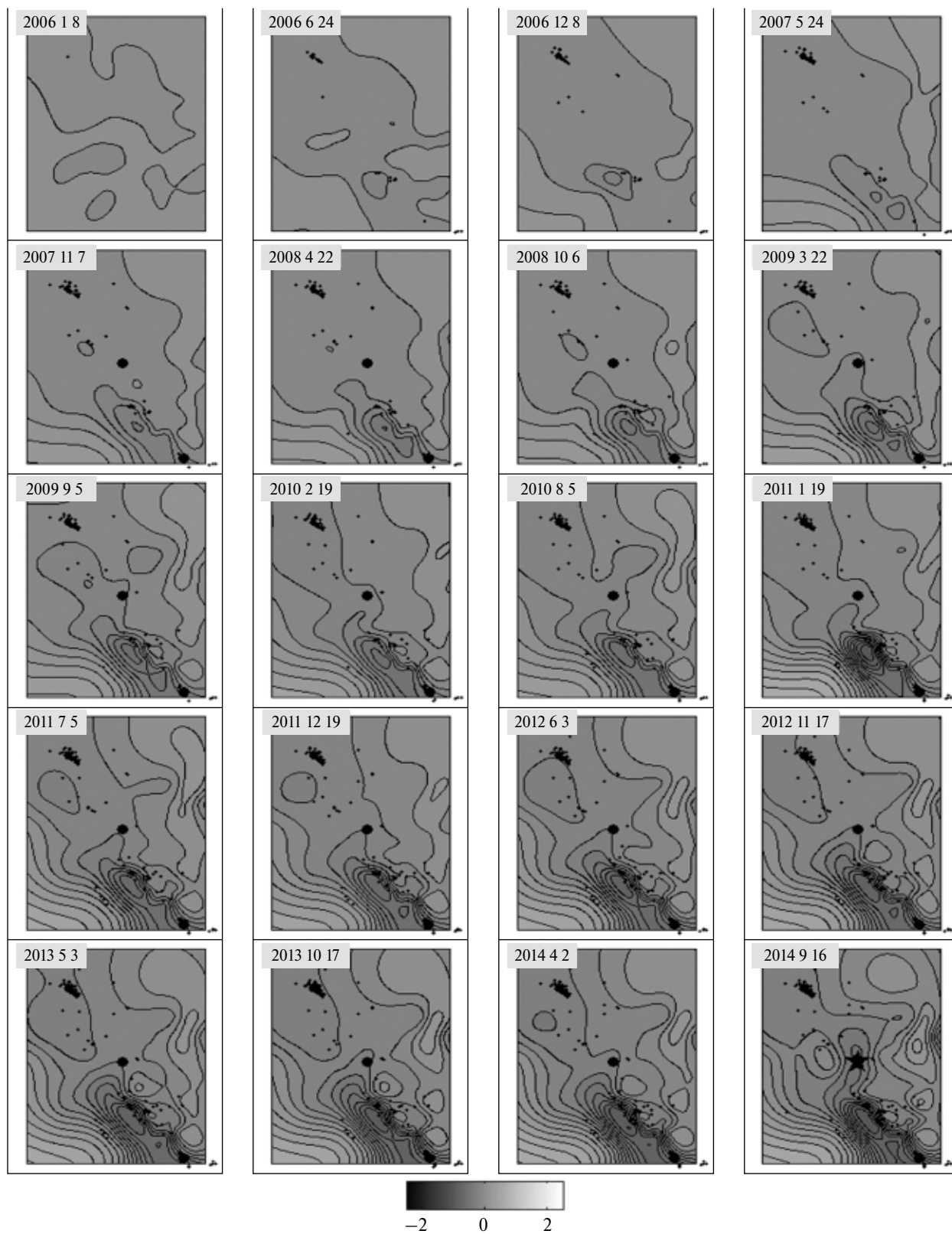
2) деформация полного сдвига:  $\gamma = ((\varepsilon_n - \varepsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2)^{1/2}$ .

Эволюция деформации максимального сдвига, представленная на рис. 1, убедительно демонстрирует непрерывное и последовательное развитие очагов деформационных аномалий в окрестности будущего крупного землетрясения.

Метод ГНСС-сейсмологии имеет лишь десятилетнюю историю. Однако с его помощью определены быстрые колебательные движения во время землетрясений Денали (2002), Сан Симеон (2003), Токачи-Оки (2003), взрывной активности вулкана Стромболи (2004) и других важных геодинамических событий [Vock et al., 2016].

Локальные наблюдательные ГНСС-сети в районах техногенной опасности способствуют обеспечению безопасной эксплуатации ответственных инженерных объектов, например, таких, как гидротехнические сооружения [Кафтан, Устинов, 2012; Kaftan, Ustinov, 2013]. Специальные геодинамические полигоны для наблюдений за современными движениями земной коры с использованием ГНСС-технологии создаются в районах захоронений радиоактивных отходов для обеспечения геоэкологической безопасности [Tatarinov et al., 2017; Morozov et al., 2012].

Применение ГНСС в области физики атмосферы, аэрономии и гидрометеорологии обусловлено возможностью зондирования различных слоев атмосферы радиоизлучением от спутника, принимаемым наземным приемником. Определение полной электронной концентрации в ионосфере ГНСС измерениями на двух несущих частотах обеспечивает важную научную информацию о состоянии этой части атмосферы, ее взаимодействии с Солнцем, магнитным полем и даже с сейсмическими событиями на Земле.



**Рис. 1.** Пространственное распределение деформации полного сдвига перед землетрясением Гаити, США (2014 г.,  $M=6.1$ ). Изолинии проведены с интервалом  $10^{-6}$ . Звезда обозначает эпицентр главного толчка. Черные кружки – эпицентры форшоков и афтершоков с  $M > 5$ . Черные точки – эпицентры слабых толчков  $3 < M < 5$ . Среднеквадратическая ошибка RMS определения деформаций менее  $10^{-7}$ .

Ионосферные карты с высоким временным и пространственным разрешением предоставляет пользователям IGS [Hernández-Pajares et al., 2009]. Глобальная пространственно-временная эволюция ионосферы играет решающую роль во взаимодействии магнитосферы, ионосферы и термосферы. Магнитное поле Земли, значительно изменяющееся в геологических масштабах, входит в число основных переменных, участвующих в анализе ионосферной проводимости.

Реакция ионосферы на землетрясения и, возможно, на их подготовку сегодня активно изучается геофизиками. Исследуется распространение ионосферных возмущений в связи с сильными землетрясениями [Гохберг и др., 2014; Перевалова и др., 2016]. Анализ вариаций полного электронного содержания по данным ГНСС до, во время и после землетрясений активно изучается мировым научным сообществом [Afraimovich et al., 2004; Carter et al., 2013]. Система мониторинга и долгосрочного прогноза состояния ионосферы средствами ГНСС разработана и введена в строй в России [Алпатов и др., 2013].

ГНСС также представляют ценную информацию для оценки прогноза погоды и климатических изменений [Hobiger, Jakowski, 2017]. С использованием наземных ГНСС-сетей осуществляется оценка содержания водяных паров в атмосфере. Непрерывные ГНСС-наблюдения в наземных сетях позволяют оценивать перемещение воздушных масс. Долгосрочные тенденции изменения содержания атмосферных водяных паров используются в качестве независимого источника данных для анализа климатических изменений. Дистанционное зондирование параметров атмосферы осуществляется по изменениям радиосигнала, приходящего от ГНСС-спутников к метеорологическим спутникам, функционирующим на более низких орбитах.

В последние годы развивается такое оригинальное направление использования ГНСС для геофизики, как ГНСС-рефлектометрия (рис. 2) [Shuanggen, Attila, 2010]. Метод представляет собой дистанционное зондирование Земли на основе анализа отраженного радиоизлучения ГНСС-спутника, приходящего на приемник другого низкоорбитального спутника. В зависимости от подстилающей отражающей поверхности и среды на пути распространения сигнала, метод имеет следующие разнообразные приложения:

– регистрация погодных условий: направление и скорость ветра, параметры удельной влажности;

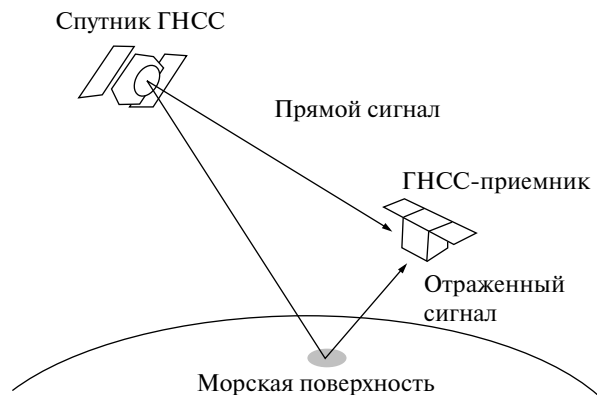


Рис. 2. Принципиальная схема ГНСС-рефлектометрии.

- изменения климата: уровень моря, ледяные покрытия моря и шельфа, соленость;
- ионосфера и космическая погода: электронная концентрация;
- прогнозирование катастроф: раннее предупреждение цунами, мониторинг наводнений;
- земная поверхность: влажность почв, поверхностная биомасса, высота и наличие снежного покрова, влагосодержание снега.

По данным ГНСС-рефлектометрии отслеживается динамика ледников Гренландии, приливы в морских заливах, влагосодержание почв в Южной Африке. Данный метод применяется для альтиметрии морской поверхности с использованием малой авиации и аэростатов.

Основным глобальным пользователем ГНСС является Международная служба ГНСС. Используя широкополосную измерительную информацию со спутников ГЛОНАСС и GPS, она вырабатывает и представляет мировому сообществу такие научные и высокотехнологичные продукты как точные и оперативные эфемериды спутников ГНСС, геоцентрические координаты ( $+3 \div 6$  мм) и скорости их изменений ( $+2 \div 3$  мм/год) следящих станций IGS, параметры вращения Земли (движение полюса и длительность суток), параметры тропосферы (тропосферная задержка и ее горизонтальные градиенты) и ионосферы (полная электронная концентрация). Эти характеристики в зависимости от уровня их точности транслируются в реальном времени или с задержками от нескольких часов до первых недель. Сеть IGS включает в себя порядка 500 глобально распределенных следящих ГНСС-станций (рис. 3).

Целый ряд интернет-архивов геопрограммных данных сегодня предоставляет широкому пользователю геоинформацию о Земле. Наиболее популярными и крупными из них

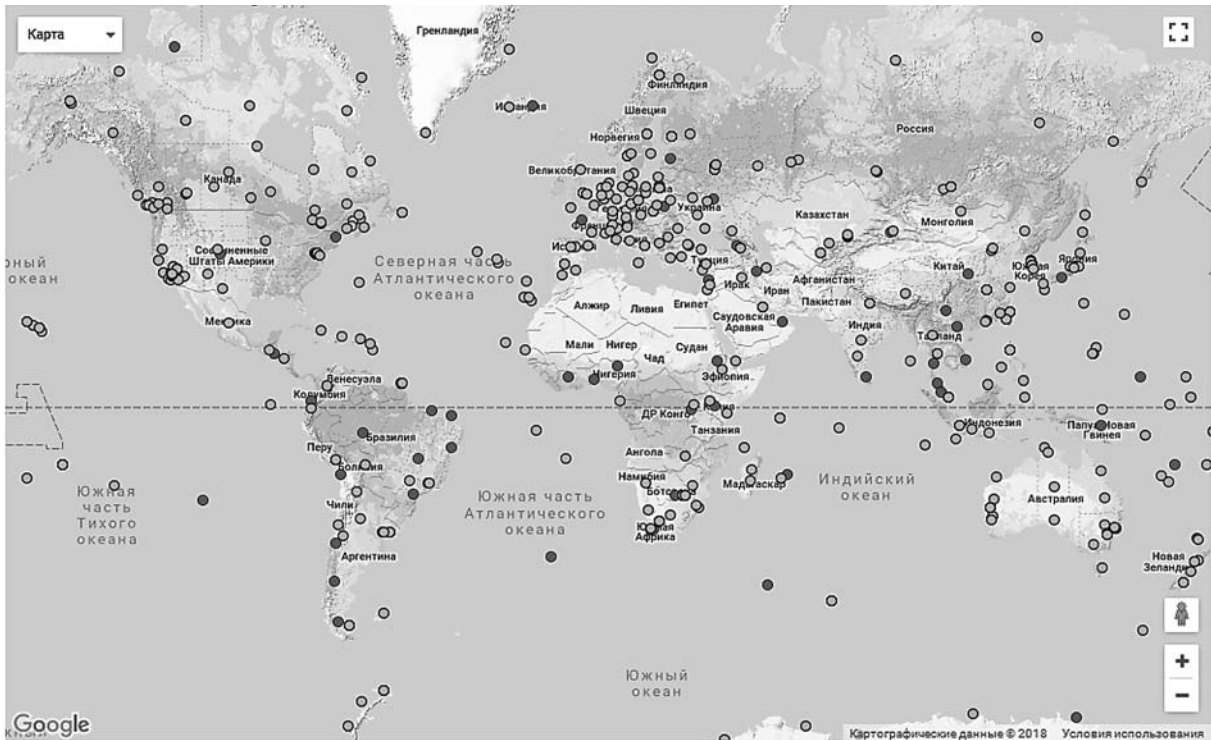


Рис. 3. Следящие ГНСС-станции сети IGS [<http://www.igs.org/network>].

являются интернет-порталы SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) и UNAVCO (University NAVSTAR Consortium). Основным их содержанием являются измерительные данные ГНСС, координаты спутников и наземных станций, а также скорости их движения. Особое место при этом занимают характеристики движений земной поверхности в районах разрушительных землетрясений, но также данные о состоянии тропосферы и ионосферы, сейсмические данные и результаты дистанционного зондирования. Наиболее обширную информацию о движениях пунктов ГНСС представляет Геодетическая лаборатория Невады (Nevada Geodetic Laboratory). Геопортал лаборатории содержит временные ряды координат стационарных ГНСС-пунктов. Он включает в себя порядка 16 000 пунктов. Данные представляют собой координатные точные решения с суточным временным разрешением (миллиметровые точности), а также оперативные экспериментальные решения с пятиминутным временным интервалом (около дециметровые точности).

Квинтэссенцией использования ГНСС в науках о Земле является Глобальная система геодетических наблюдений (Global Geodetic Observing System), созданная и развиваемая Международной ассоциацией геодезии (IAG). Ее научной целью является совершенствование знаний

о динамике Земли путем количественной оценки изменений планеты в пространстве и времени. Ядром наблюдательной системы являются так называемые коровые (core sites) и коллокационные (collocation sites) пункты, обеспечивающие высокую стабильность земной координатной опоры для разнообразных геодетических и геофизических применений.

Современным итогом развития ГНСС-технологий для геофизики и геодинамики является расширение сферы их деятельности и их дифференциация на несколько независимых направлений. Из монодисциплины, направленной на определение местоположения и передачу времени, она превратилась в совокупность научных направлений, среди которых наиболее современными являются ГНСС-сейсмология, ГНСС-метеорология и ГНСС-рефлектометрия.

### МЕЖДУНАРОДНАЯ СЕТЬ ПОЛНОМАСШТАБНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ИНТЕРМАГNET И МАГНИТНЫЕ ОБСЕРВАТОРИИ РОССИИ

Главным источником оперативных геопрограммных данных о МПЗ в течение уже более чем 200 лет являются магнитные обсерватории. Геомагнитные данные необходимы для решения широкого круга фундаментальных научных

и практических задач. Они отражают изменения МПЗ в различных временных масштабах, позволяя учитывать как короткопериодические (секунды, минуты), так и вековые (годы, десятки лет) вариации. Последнее крайне важно для понимания сложных динамических процессов, протекающих в жидком ядре (быстрые вариации поля), изучения токовых систем в ионосфере и магнитосфере и взаимодействия с солнечным ветром. Продолжительные ряды стационарных магнитных наблюдений позволяют проводить анализ эволюции — *векового хода* — главного магнитного поля Земли; изучать характеристики variability поля, связанные локальными естественными магнитными неоднородностями коры в месте расположения обсерваторий. Особую ценность представляют обсерватории, расположенные в полярных регионах. На основе обсерваторских данных рассчитываются основные индексы магнитной активности (например, локальные К-индексы или планетарный К<sub>p</sub>-индекс) [Macmillan, 2007; Matzka et al., 2010; Reay et al., 2011]. Современные обсерватории, регистрирующие данные с частотой до 1 с, позволяют изучать широкий спектр геомагнитных пульсаций [Зелинский и др., 2014]. Обсерватории, расположенные вблизи мест разработки углеводородов, предоставляют данные, необходимые для поддержки наклонно-направленного бурения, особенно в высоких широтах [Гвишиани, Лукьянова, 2015б; Buchanan et al., 2013]. Данные высокоширотных обсерваторий используются для изучения геомагнитно-индуцированных токов и их влияния на промышленную инфраструктуру [Pirjola, 2012]. Важной областью применения обсерваторских геомагнитных данных является поддержка систем навигации по естественным полям и координатно-временное и навигационное обеспечение систем спутниковой навигации.

Сегодня обсерватории обеспечивают точные измерения величины полного вектора геомагнитного поля и вариаций его трех ортогональных компонент (рис. 4) в фиксированных точках. Набор обсерваторского измерительного оборудования включает в себя: скалярные магнитометры (измерение модуля вектора геомагнитного поля  $F$ ), трехосевые феррозондовые вариометры (измерение вариаций ортогональных компонент вектора геомагнитного поля —  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  или  $H$ ,  $D$ ,  $Z$ ) и феррозондовые деклинометры/инклинометры (измерение абсолютных значений  $D$  и  $I$ , необходимых для коррекции вариационных данных и формирования *базисной линии* — определяемого экспериментально начального уровня, к которому осуществляется привязка вариационных измерений компонент

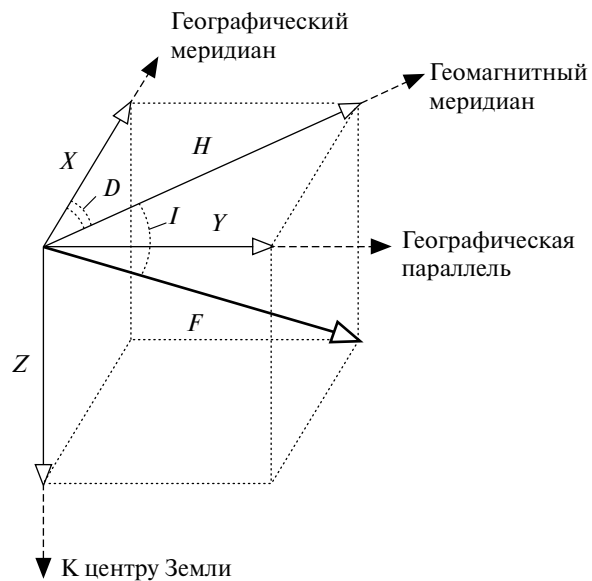


Рис. 4. Разложение вектора геомагнитного поля в декартовых ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), цилиндрических ( $D$ ,  $H$ ,  $Z$ ) и сферических ( $D$ ,  $I$ ,  $F$ ) системах координат [Соловьев и др., 2012].

МПЗ), а также компьютерная система для сбора, временного хранения и передачи измеренных данных по линиям связи. Конечным продуктом являются 1-минутные (в ряде случаев — 1-секундные) геомагнитные вариации, привязанные к абсолютным измерениям [Jankowsky, Sucksdorff 1996; Love, Chulliat, 2013; Macmillan, 2007].

Оперативные обсерваторские магнитограммы могут содержать техногенные возмущения или пропуски и не всегда откалиброваны относительно абсолютных наблюдений. Они имеют статус *предварительных (preliminary)* данных и предоставляются с минимальными временными задержками. Обсерваторским данным, которые прошли привязку к базисной линии, удаление искусственных помех и заполнение пропусков, присваивается статус *окончательных (definitive)* данных. Их подготовка является трудоемкой процедурой, которая проводится в основном вручную квалифицированными магнитологами с задержкой до нескольких лет. В 2011 г. был представлен новый тип обсерваторских данных — *квазиокончательные (quasi-definitive)* магнитограммы, которые корректируются с помощью временных базисных линий. Также из них исключаются все техногенные выбросы и пропуски. Они готовятся с задержкой в несколько месяцев. [Gvishiani et al., 2016; Reay et al., 2011; St-Louis et al., 2012].

Часто в труднодоступных и малонаселенных районах используются магнитовариационные

станции (МВС), способные работать в автоматизированном режиме и не требующие постоянного присутствия персонала. Главная задача МВС – регистрация отклонений геомагнитного поля от определенного установленного базисного уровня.

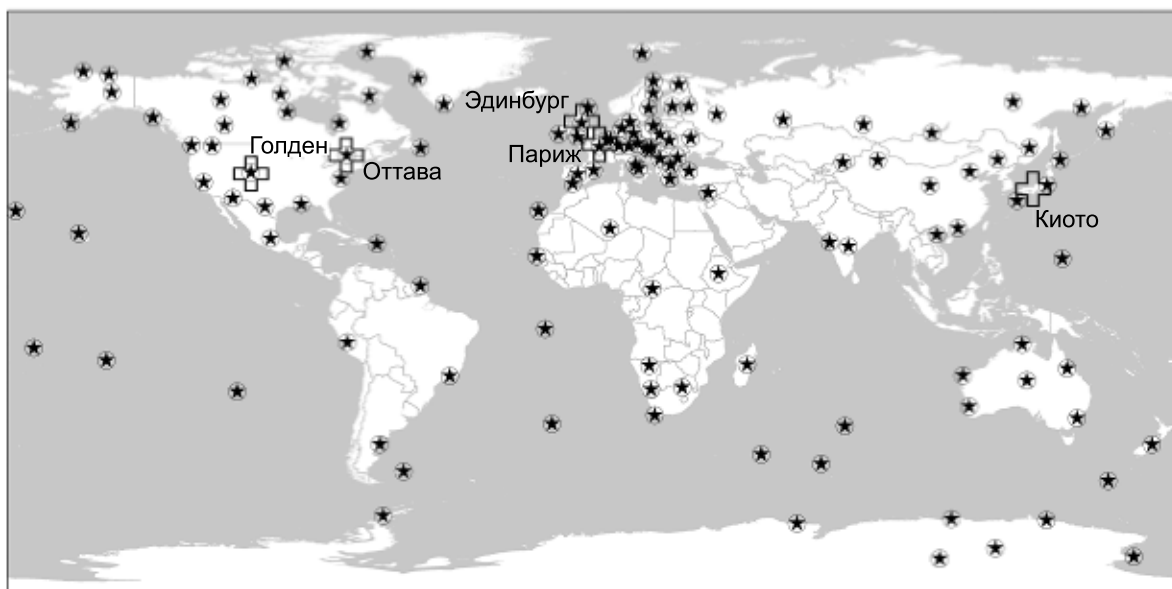
Основным инструментом МВС являются феррозондовые (реже – кварцевые) вариометры. Качество данных, предоставляемых МВС уступает обсерваторским, однако меньшие требования к необходимой инфраструктуре позволяют развивать более плотные сети МВС. Глобальная сеть магнитных обсерваторий насчитывает около 200 пунктов. Количество МВС в несколько раз превосходит число обсерваторий и достигает нескольких сотен [Love, 2008; Manda, Papitashvili, 2009].

Крупнейшей и наиболее развитой скоординированной международной сетью геомагнитных обсерваторий, предоставляющей геомагнитные данные в соответствии с самыми высокими стандартами качества, является сеть ИНТЕРМАГНЕТ (International Real-time Magnetic Observatory Network). Сеть была основана в конце 1980-х гг. как добровольное международное объединение исследовательских организаций в области геомагнетизма и геофизики. С момента своего создания это сообщество согласовывает и продвигает самые высокие стандарты геомагнитных измерений, передачи, обработки и верификации данных. Усилиями участников ИНТЕРМАГНЕТа была значительно

расширена международная сеть глобального геомагнитного мониторинга. На сегодняшний день ИНТЕРМАГНЕТ включает в себя почти 60 организаций из 40 стран мира, обеспечивающих работу более чем 130 геомагнитных обсерваторий. Число обсерваторий непрерывно увеличивается. На рис. 5 представлена карта сети ИНТЕРМАГНЕТ [INTERMAGNET, 2013; Love, Chulliat, 2013]. В соответствии со стандартами предварительные данные наблюдений в течение 72 часов поступают из обсерваторий для дальнейшей обработки в пять международных узлов сбора данных (Geomagnetic Information Node – GIN), расположенных в городах: Голден (Колорадо, США), Оттава (Канада), Эдинбург (Великобритания), Париж (Франция), Киото (Япония). Кроме хранения и организации доступа к предварительным данным специалисты узлов участвуют в подготовке окончательных данных. Окончательные данные для конкретной обсерватории международной сети ИНТЕРМАГНЕТ готовятся ежегодно, но с задержкой до нескольких лет.

Подготовка квазиокончательных данных выполняется преимущественно вручную, и, таким образом, осуществляется только на отдельных обсерваториях [St-Louis et al., 2012].

Начало регулярных стационарных магнитных наблюдений в России было положено в 1830-е гг., когда известный физик, академик Петербургской академии наук А.Я. Купфер организовал первые



⊗ Обсерватории ИНТЕРМАГНЕТ

⊕ Геомагнитные информационные узлы (GIN)

Рис. 5. Международная сеть магнитных наблюдений ИНТЕРМАГНЕТ.



магнитометеорологические обсерватории горного ведомства. В 1880–1890-е гг. усилиями российских физиков Г.Ф. Абельса, П.К. Мюллера, Э.В. Штеллинга, А.В. Вознесенского происходит модернизация и дальнейшее расширение российской магнитометрической сети. Важным этапом развития геомагнитных наблюдений в России был Международный геофизический год (1957–1958 гг.). Особый вклад в эту деятельность внесли выдающиеся советские геофизики и магнитологи Н.В. Пушков, А.А. Логачёв, Ю.Г. Шафер [Жеребцов, 2015; Кусонский, 2012].

Россия стала участником ИНТЕРМАГНЕТ в 1998 г., когда в сеть была включена первая российская обсерватория «Иркутск» (IRT), основанная в 1884 г. [Гвишиани, Лукьянова, 2015а]. Усилиями Геофизического центра РАН (ГЦ РАН) и Отделения математической геофизики и геоинформатики Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН) после 2005 г. российский сегмент ИНТЕРМАГНЕТ расширился. В настоящее время он включает в себя 10 обсерваторий (9 на территории РФ и 1 – в Антарктиде), что сопоставимо с развитыми

странами мира: на территории США развернуто 14 обсерваторий, в Канаде – 10. Но следует заметить, что территория этих стран значительно меньше по площади. Таким образом, плотность российской сети обсерваторий очевидно является недостаточной.

Одной из первых в 2002 г. была развернута полномасштабная цифровая магнитная обсерватория ИФЗ РАН «Борок» (ВОХ), получившая вскоре, в 2004 г., статус обсерватории ИНТЕРМАГНЕТ. Большой вклад в ее создание внесла магнитная обсерватория, возглавляемая академиком Ж.-Л. ЛеМуэлем (J.-L. LeMouél) из Парижского института физики Земли (IPGP) [Chulliat, Anisimov, 2008]. Почти все российские обсерватории являются подразделениями институтов РАН. Исключение составляет лишь антарктическая обсерватория «Восток» (VOS), являющаяся подразделением Арктического и Антарктического НИИ Росгидромета. Карта российской сети геомагнитных обсерваторий приведена на рис. 6.

Начиная с 2010 г. центральную координирующую роль в развитии наземных геомагнитных

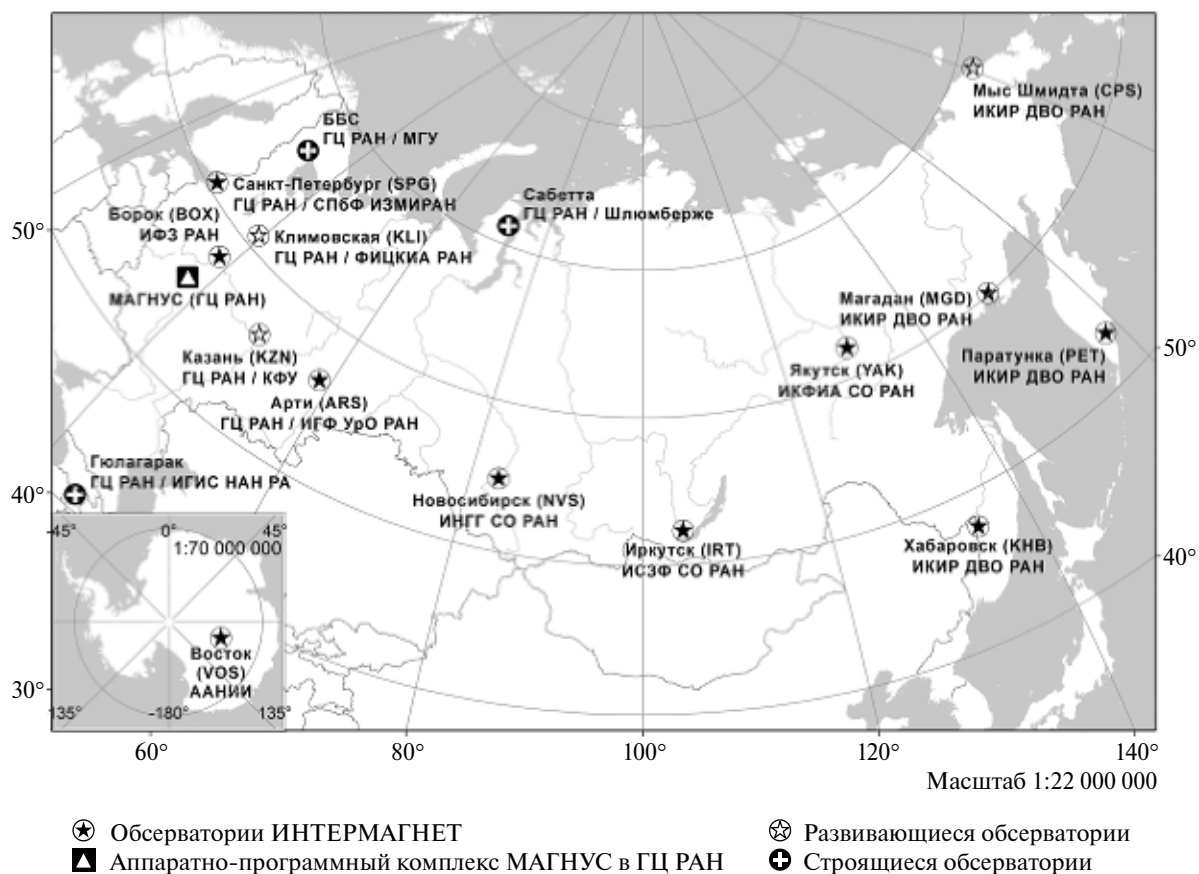


Рис. 6. Действующие геомагнитные обсерватории в России. Указаны организации, ответственные за функционирование обсерваторий.

наблюдений нашей страны стал выполнять ГЦ РАН. При его поддержке несколько существующих геомагнитных обсерваторий были модернизированы для соответствия стандартам ИНТЕРМАГНЕТ. Среди них: «Арти» (ARS), «Санкт-Петербург» (SPG), «Казань» (KZN). в апреле 2016 г. обсерватория «Санкт-Петербург» официально вошла в сеть ИНТЕРМАГНЕТ. В 2012 г. на юге Архангельской области началось строительство новой обсерватории «Климовская» (KLI). Этот совместный проект ГЦ РАН и ИФПА УрО РАН (в настоящее время входит в ФИЦ Комплексного изучения Арктики им. ак. Н.П. Лавёрова РАН) находится на стадии завершения. В дальнейшем на обсерватории будет установлен пункт ГНСС-наблюдений с включением в сеть IGS. В 2016 г. совместными усилиями ГЦ РАН, ИФЗ РАН и IPGP обсерватория «Борок» (BOX) была модернизирована до стандарта 1-секундной регистрации данных [Гвишиани, Лукьянова, 2015а; Кафтан, Красноперов, 2015; Кафтан и др., 2015; Красноперов и др., 2015; Соловьев и др., 2016; Gvishiani et al., 2014; 2016; Sidorov et al., 2017].

С 2013 г. ГЦ РАН участвует в проекте по созданию высокоширотной обсерватории стандарта ИНТЕРМАГНЕТ на полуострове Ямал в пос. Сабетта (Ямало-Ненецкий АО), которая создается для обеспечения процессов направленного бурения в рамках проекта Ямал СПГ [Гвишиани, Лукьянова, 2015б]. В 2017 г. ГЦ РАН совместно с Институтом геофизики и инженерной сейсмологии им. ак. А. Назарова НАН Республики Армения (ИГИС НАН РА) начато развертывание геомагнитной обсерватории на геофизическом полигоне в Армении. Также в 2018 г. начато создание совместной МВС ГЦ РАН и Биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова на территории Беломорской биологической станции (ББС) им. Н.А. Перцова (Карелия). Проведена детальная магнитная съемка на территории ББС, определено место возведения павильона и начато его строительство. Первоначальный проект предполагает размещение только магнитометра POS-4 [Sapunov et al., 2016].

Работа по развитию сети высокоточных геомагнитных наблюдений на территории России ведется достаточно активно и эффективно. Однако подготовка окончательных данных происходит не на всех российских обсерваториях. Для некоторых обсерваторий эти работы проводятся в ГЦ РАН или в зарубежных геомагнитных информационных узлах ИНТЕРМАГНЕТ. Такое положение следует устранить в самом ближайшем будущем.

В ноябре 2013 г. Европейским космическим агентством было запущено 3 спутника Swarm. Два спутника (Swarm A и C) запущены на близкие орбиты с наклоном  $87.4^\circ$  со средней высотой 450 км. Третий спутник (Swarm B) запущен на круговую орбиту с наклоном  $88^\circ$  и средней высотой 530 км. Данные Swarm представляют собой временные ряды измерений компонент полного вектора геомагнитного поля с частотой 1 Гц и 50 Гц. Измерения геомагнитного вектора дополняются точными пространственными и инерциальными измерениями и наблюдениями за плазмой и электрическим полем [Olsen et al., 2013].

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ИНТЕРМАГНЕТ И SWARM. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «МАГНУС»

Быстрый рост объемов данных магнитных измерений требует использования адекватных методов геоинформатики и системного анализа для их эффективной обработки и анализа. Современные методы позволяют формализовать многокритериальное распознавание экстремальных магнитных явлений различной природы, а также определять фоновое состояние геомагнитного поля.

В 2014–2016 гг. в ГЦ РАН была создана аналитическая аппаратно-программная система (АПК) МАГНУС (Мониторинг и анализ геомагнитных аномалий в унифицированной среде) (рис. 7), предназначенная для эффективного сбора, хранения, обработки и интеллектуального анализа геомагнитных данных [Gvishiani et al., 2016]. МАГНУС является ядром российской сети магнитных наблюдений и обеспечивает скоординированную обработку обсерваторских данных. В системе интегрированы инструменты сбора, эффективного хранения и системного анализа геомагнитных данных как от российских обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ, так и от низкоорбитальной спутниковой группировки Swarm. Включение данных Swarm в МАГНУС делает его уникальным современным инструментом для скоординированного хранения и анализа наземных и спутниковых геомагнитных данных. Таким образом, обеспечивается объединение и комплексирование информации из принципиально различных источников, что расширяет области применимости МАГНУСа.

АПК включает в себя несколько интегрированных аппаратных и программных блоков,

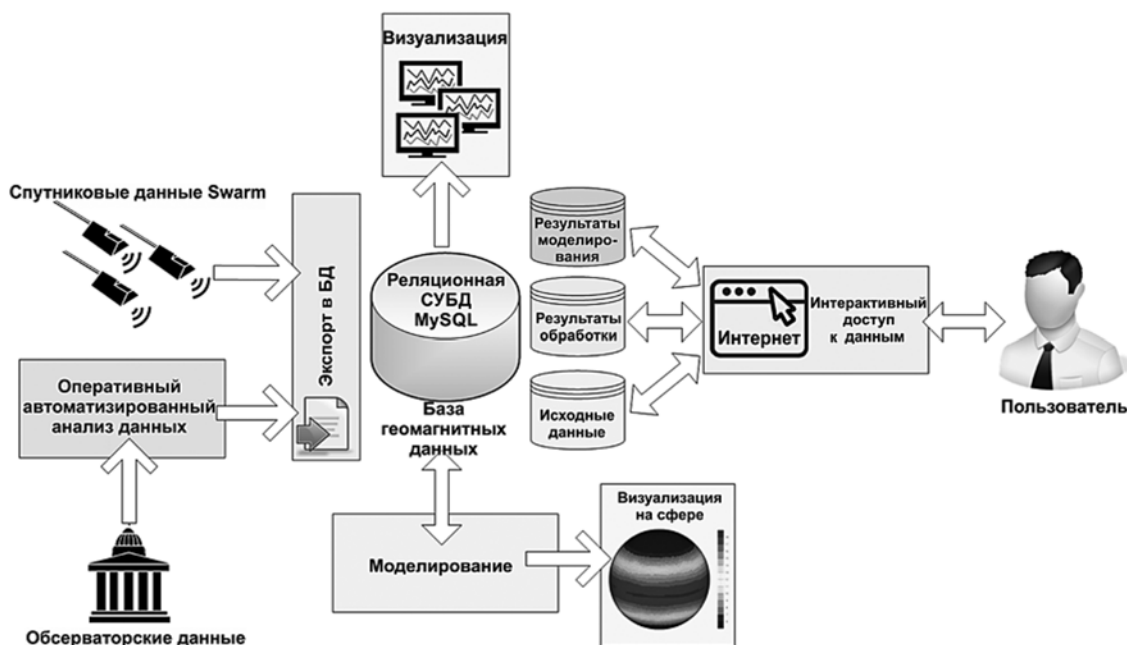


Рис. 7. Блок-схема информационной структуры АПК МАГНУС.

объединенных в единую логическую и операционную структуру. МАГНУС базируется на единой информационной и телекоммуникационной модульной инфраструктуре, при этом оставаясь открытым для расширения и установки дополнительных программных компонентов. Функционал АПК позволяет выполнять многокритериальный анализ магнитограмм с использованием стандартных индикаторов геомагнитной активности: оценка скорости изменения ( $dB/dt$ ) и амплитуды геомагнитных событий и оперативный расчет К-индекса геомагнитной активности. Также в рамках проекта создания АПК МАГНУС был предложен новый индикатор—мера аномальности. Мера аномальности  $\mu$  для данной скалярной функции  $f(x)$ , определенной на конечном метрическом пространстве  $X$ ,  $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ , представляет собой нечеткую структуру на  $X$ , отвечающую на вопрос, в какой степени функция  $f$  аномальна (активна или экстремальна) в точке  $x$ ? Для этого определяются понятие аномальности и степени ее проявления. Аномальность  $\mu$  реализуется как семейство неотрицательных количественных динамических показателей  $\{D_f, D \in \mathcal{D}\}$ , а степень проявления аномальности как мера максимальности этих показателей [Гвишиани и др., 2008а; б; Agayan et al., 2018; Gvishiani et al., 2004b; Soloviev et al., 2016]:

$$\mu D_f = \text{mesmax} D_f. \quad (3)$$

Хранение геомагнитных данных (исходных и обработанных) в МАГНУСе организовано в реляционной базе геомагнитных данных под управлением СУБД. Это является существенным преимуществом по сравнению с существующими пятью международными геомагнитными информационными узлами ИНТЕРМАГНЕТ, которые используют традиционные файловые базы данных. Инновационный аналитический блок АПК основан на формализованной интеграции знаний и опыта, накопленного экспертами в области распознавания экстремальных явлений и антропогенных возмущений на магнитограммах. Элементы искусственного интеллекта являются частью соответствующих алгоритмов, которые включены в АПК [Gvishiani et al., 2016].

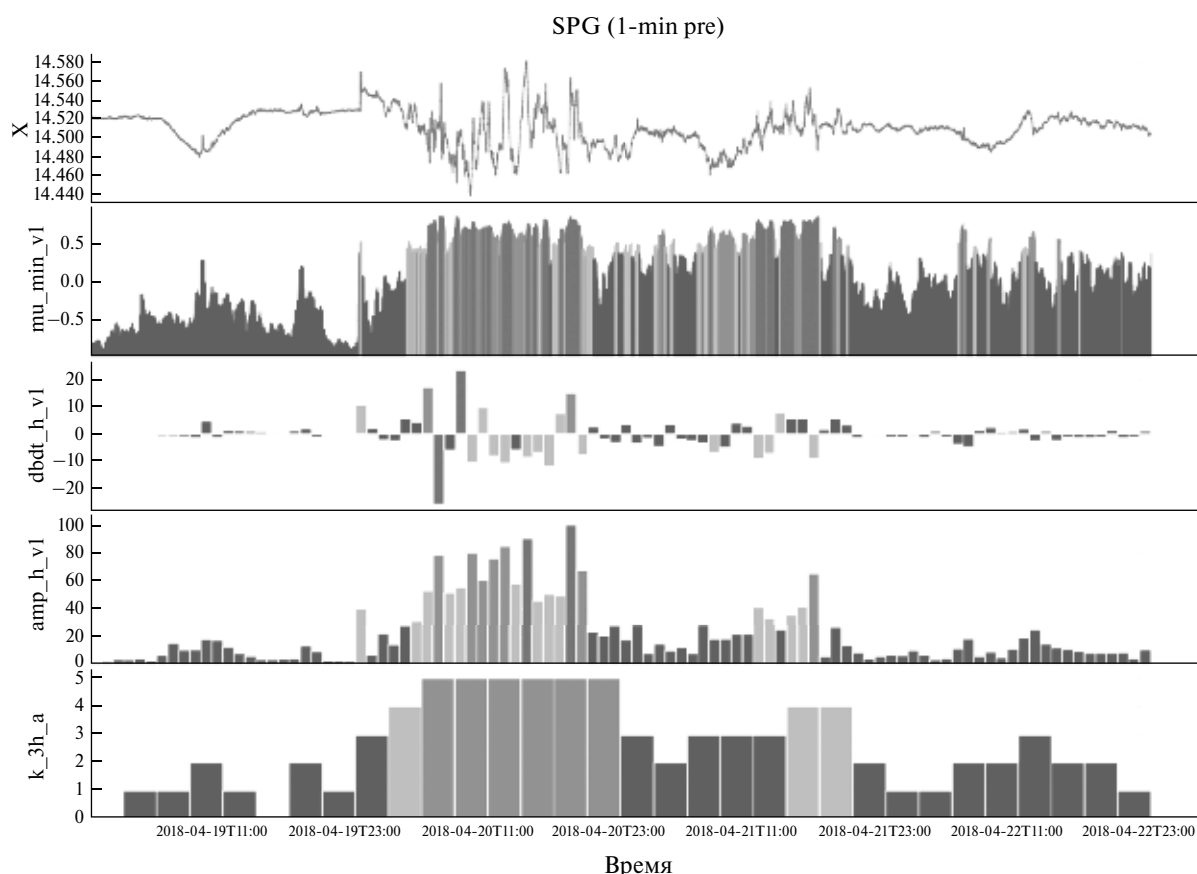
МАГНУС призван выполнить следующие задачи: поиск и систематизация исходных наземных и спутниковых наблюдений магнитного поля Земли; автоматизированная фильтрация обсерваторских данных от искусственных помех и их верификация в соответствии со стандартами ИНТЕРМАГНЕТ; распознавание, классификация и кодирование данных об экстремальных геомагнитных явлениях, потенциально опасных для технологической инфраструктуры и хозяйственной деятельности; модельные расчеты; обеспечение интерактивного доступа к исходным данным, информации об экстремальных явлениях, а также результатов моделирования; визуализация геомагнитных данных. Все данные (магнитограммы и результаты модельных расчетов), сохраняемые

в МАГНУСе, доступны пользователям через веб-интерфейс (<http://geomag.gcras.ru/>).

Важной особенностью является автоматизация в реальном времени распознавания техногенных аномалий (например, выбросов или «спайков» [Soloviev et al., 2012]) во входящих магнитограммах, а также привязка к базисной линии и последующий расчет квазиокончателных данных. Для иллюстрации рассмотрим недавние периоды пониженной и повышенной магнитной активности, произошедшие с 19 по 22 апреля 2018 г. В данном примере использованы минутные данные, зарегистрированные обсерваторией «Санкт-Петербург» (SPG) и переданные для обработки в МАГНУС (рис. 8). Начало фрагмента является магнитоспокойным, что характеризуется близкими к 0 значениями планетарного  $Kp$ - и региональных  $K$ -индексов. Основная фаза геомагнитной бури произошла 20 апреля. Она характеризуется значениями  $Kp$ -индекса, достигающими до 6 [GFZ, 2018].

Возмущения в  $X$ -компоненте, связанные с бурей, характеризуются большими значениями меры аномальности и амплитуды. Большие значения индикатора  $dB/dt$  (до  $-25$  нТл/час) в начальной фазе бури также отражают возмущения  $X$ -компоненты. Оперативные значения  $K$ -индекса достигали величины 5, что близко к глобальному  $Kp$ -индексу. По всем индикаторам активности данный период классифицирован как «аномальный» и «сильно аномальный». Таким образом, АПК МАГНУС обеспечивает распознавание и оценку природной геомагнитной активности с помощью нескольких независимых индикаторов. Последнее важно для экспертов и ответственных лиц, которым эта информация необходима для оценки и снижения возможных рисков, вызванных экстремальными геомагнитными явлениями.

АПК МАГНУС создает новую парадигму в системах сбора, обработки и очистки магнитной информации. Эта парадигма связана с концепцией *больших данных*, которая интерпретируется как



**Рис. 8.** Графическое представление вариаций компоненты  $X$  (верхний график) обсерватории «Санкт-Петербург» (SPG) и соответствующие индикаторы геомагнитной активности для периода 19–22 апреля 2018 г:  $\mu_{\min\_v1}$  — минутные значения меры аномальности компоненты  $X$ ;  $dbdt\_h\_v1$  — максимальные часовые значения скорости изменения ( $dB/dt$ ) компоненты  $X$ ;  $amp\_h\_v1$  — часовые максимальные амплитуды компоненты  $X$ ;  $k\_3h\_a$  — 3-часовой  $K$ -индекс. Различные оттенки графиков индикаторов геомагнитной активности отражают различное состояние возмущенности магнитного поля.

четыре  $V$  [Roberts, 2016]: *объем (volume)*, *разнообразие (variety)*, *скорость (velocity)* и *достоверность (veracity)*. Объем (первая  $V$ ) достигается за счет обширных массивов данных, обрабатываемых системой.

МАГНУС представляет собой первый целостный инструмент системного анализа, который позволяет совместно обрабатывать разнообразные (вторая  $V$ ) обсерваторские и спутниковые магнитные данные, обеспечивая высокий уровень их координации. Предоставляемая МАГНУСом скорость (третья  $V$ ) доступа к надежным (четвертая  $V$ ) магнитограммам является ключевой характеристикой для геомагнетизма и его применений.

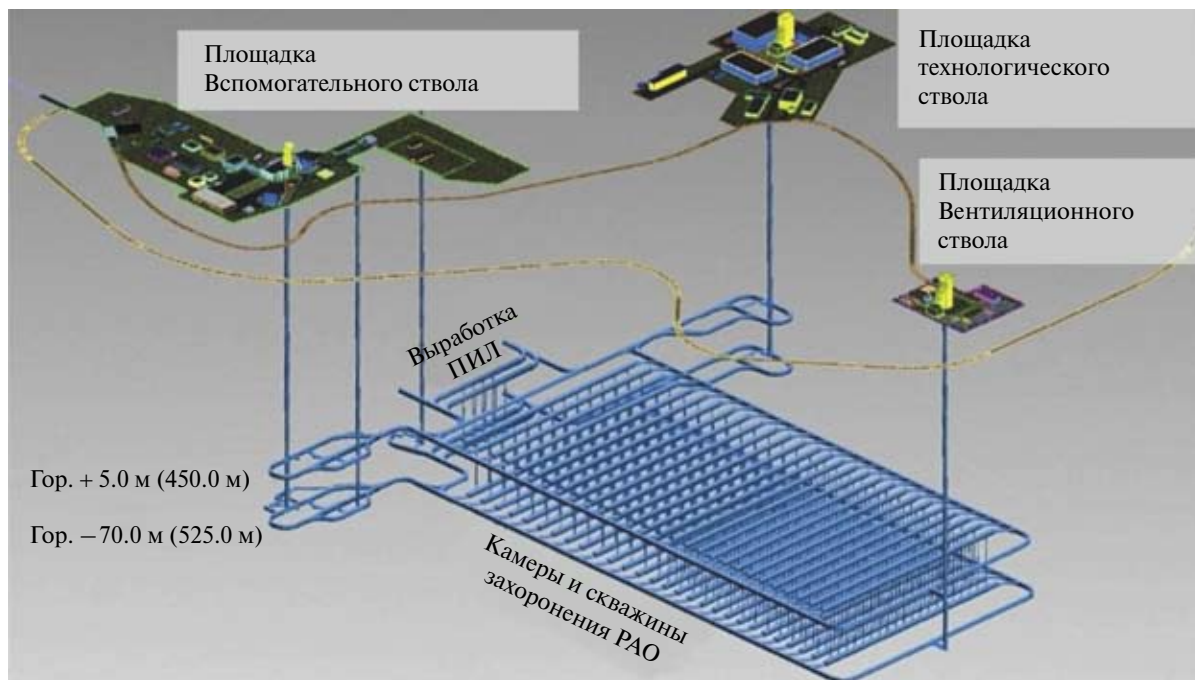
### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ МЕСТ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Геоинформатика и системный анализ востребованы в исследованиях ГЦ РАН и ИФЗ РАН, направленных на решение важнейшей экологической проблемы страны — подземной изоляции радиоактивных отходов (РАО) [Гвишиани, 2008в; 2017; Татарин, 2017]. За период интенсивного развития атомной промышленности на территории России накоплено свыше 510 млн м<sup>3</sup> РАО, включая высокоактивные радиоактивные отходы. При существующем научно-техническом

уровне эта проблема может быть решена единственным осуществимым способом — захоронением высокоактивных РАО в глубокие геологические формации.

В настоящее время в разной степени готовности реализуются проекты подземной изоляции РАО в различных геологических формациях: *в солях* (Германия, США), *в гранитах* (Швеция, Финляндия, Швейцария, Канада, Россия), *в глинах* (Франция, Швейцария, Бельгия) и *туфах* (США). Выбор стабильного структурно-тектонического блока земной коры, который сохранит свои изоляционные свойства на весь период радиобиологической опасности РАО, превышающий 10 тыс. лет, является сложнейшей мультидисциплинарной задачей в области наук о твердой Земле. Пока еще ни в одной экономически развитой стране ее решение не доведено до практической реализации.

В конце 90-х гг. в нашей стране было принято решение о строительстве пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) в гранитогнейсовых породах Нижне-Канского массива. В итоге многолетних инженерно-геологических изысканий для строительства ПГЗРО был выбран участок Енисейский, расположенный в его северной части. Конструктивно ПГЗРО представляет собой комплекс горных выработок на глубине 500 м (рис. 9), включающий в себя 5 шахтных стволов и 2 горизонта гори-



**Рис. 9.** Принципиальная схема пункта глубинного захоронения РАО и подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) в пределах Нижне-Канского массива.

зонтальных выработок, размер которых в плане составляет  $1.0 \times 1.5$  км.

Такое крупное подземное сооружение может негативно влиять на изоляционные свойства породного массива. Дифференцированные геодинамические движения, вызванные тектоническим крипом, местные и удаленные землетрясения, а также экзогенные явления представляют наибольшую угрозу для устойчивости структурно-тектонического блока (СТБ), вмещающего выработки ПГЗРО. Это может привести к разрушению СТБ и инженерных барьеров ПГЗРО и последующей инфильтрации радионуклидов с подземными водами в окружающую среду.

В настоящее время в ГЦ РАН разрабатывают методы системного анализа для оценки и прогноза *устойчивости структурно-тектонических блоков земной коры*, подверженных внешнему воздействию геодинамических процессов. Созданию таких методов системного анализа посвящен проект РНФ № 18-17-00241. Цель проекта – решение фундаментальной геолого-геофизической научной проблемы обеспечения геодинамической безопасности подземной изоляции высокоактивных РАО в геологических формациях, в приложении к условиям Нижне-Канского массива.

Под устойчивостью СТБ понимается его способность при природных и техногенных воздействиях сохранять или изменять свои инженерно-геологические свойства в таком диапазоне, который не приведет к потере изоляционных свойств пород, препятствующих выходу радионуклидов за пределы ПГЗРО на период радиобиологической опасности РАО.

Возможность прогнозирования устойчивости СТБ основано на двух фундаментальных свойствах геологической среды:

1) это *динамическая активная система*, имеющая внутренние и внешние геодинамические источники дестабилизации;

2) среда *пространственно иерархически структурирована*, а накапливаемая в ней потенциальная энергия разрушения диссипируется на иерархической системе разломов и трещин.

Исходя из этого для оценки и прогноза устойчивости конкретного СТБ необходимо решить следующие основные задачи [Татаринов, 2017]:

а) определить степень структурной нарушенности, блочности, анизотропии, упругих свойств породного массива в СТБ, а также установить степень активности крупных тектонических разломов в этом массиве;

б) исследовать закономерности распределения полей напряжений и деформаций, включая моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) среды;

в) дифференцировать территорию по степени ее устойчивости (геодинамическое районирование);

г) принять обоснованное решение о пригодности СТБ для безопасного захоронения РАО.

Огромную роль в решении этих задач играют геофизические методы. Данные изучения магнитного поля используются, например, при выделении скрытых тектонических нарушений в кристаллическом фундаменте [Андерсон и др., 2011]. Результаты ГНСС-наблюдений и высокоточного нивелирования служат основой для выявления активных разломов.

Системный подход к анализу информации, например, по Квейду [Квейд, 1969] позволяет наметить последовательные этапы исследований при выборе мест подземной изоляции РАО:

1. Задачи – определение проблемы, выявление целей и определение границ решения.

2. Поиск – создание баз данных и определение средств достижения целей.

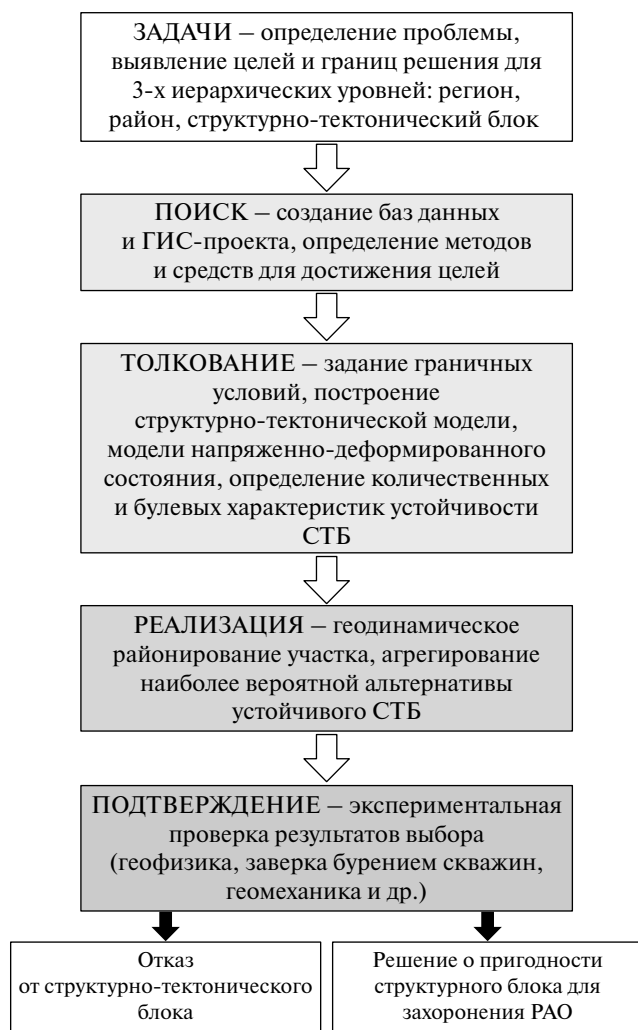
3. Толкование – построение моделей НДС и их детальный анализ.

4. Реализация – агрегирование наиболее вероятной альтернативы.

5. Подтверждение – экспериментальная проверка решения.

На рис. 10 представлена логическая схема, определяющая место системного анализа в проблеме оценки и прогнозирования устойчивости СТБ при захоронении высокоактивных РАО в геологических формациях. В начале работ в максимальном объеме собирается информация о геологической среде и составляется ГИС-проект, позволяющий использовать при системном анализе элементы современных методов искусственного интеллекта [Гвишиани, 2017]. Одновременно проводятся геолого-геофизические исследования, позволяющие получить дополнительные данные: физико-механические свойства пород, параметры структурной нарушенности, включая выявление скрытых тектонических разрывов фундамента, амплитуды тектонических движений разломов, скорости современных движений земной коры по данным ГНСС-наблюдений и т. д. [Татаринов, 2006; Mогозов, 2012].

На этом этапе, в частности, могут использоваться методы распознавания мест землетрясений на основе алгоритма выявления сгущений



**Рис. 10.** Системный подход к анализу информации при прогнозе устойчивости структурно-тектонических блоков земной коры для захоронения в них высокоактивных РАО.

[Гвишиани, 2017б], а также распознавания скрытых тектонических разломов и линеаментных структур в фундаменте методами дискретного математического анализа (ДМА) [Gvishiani et al., 2004a] и т. д. Эти результаты позволяют построить модель СТБ и задать граничные условия для 3D-моделирования НДС внутри структурного блока и по его границам.

Построенные модели и системные прогнозные оценки должны пройти экспериментальную проверку в подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) (геомеханические, геофизические, гидрогеологические методы, бурение скважин и т. д.). Строительство ПИЛ планируется начать на участке Енисейский в 2019 г. После проведения экспериментов в ПИЛ будет принято решение об устойчивости или неустойчивости СТБ, и, соответственно, будет сделан вывод

о пригодности СТБ и участка Енисейский (границы которого близки к границам СТБ) для захоронения высокоактивных РАО.

## ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время в мире наблюдается тенденция развертывания комплексных геофизических и геодинамических наблюдательных сетей, позволяющих получать для заданной территории временные ряды данных различных типов. Геоинформатика интегрирует эти данные и доводит их до исследователя-геофизика в удобной и концентрированной форме, например, в виде интеллектуальной ГИС. Комплексирование методов, основанных на различных физических принципах, позволяет получать наиболее достоверное отражение физических процессов, протекающих в оболочках Земли. Перспективным направлением является объединение ГНСС-сетей и магнитных обсерваторий в единую наблюдательную сеть.

Важнейшим качеством ГНСС является их многофункциональность, которая обеспечивается использованием в едином решении всей совокупности наблюдательных геодезических систем. Примером этого являются коллокационные и основные станции Глобальной системы геодезических наблюдений. Несмотря на то, что в таком единении используются многие современные наблюдательные средства астрономии, геодезии и геофизики, новый качественный научный прорыв может обеспечить дальнейшее расширение единого комплекса наблюдательных средств и объединение разнодисциплинарных наблюдательных сетей. Этому должно способствовать, например, совмещение магнитных станций и ГНСС-пунктов, что позволит более глубоко изучать не только состояние атмосферы, магнитного поля Земли и магнитосферы, но и совершенствовать знания о геодинамических механизмах, происходящих в литосфере процессов. Для этого целесообразно создавать комплексные наблюдательные станции (super sites), по аналогии, например, с коллокационными станциями системы GGOS.

АПК МАГНУС реализует системный подход к анализу геомагнитных данных. Его модули обработки данных используют традиционные и инновационные математические методы, которые обеспечивают многокритериальный и комплексный анализ геомагнитных данных. Однако для эффективного использования геомагнитных данных необходима их актуализация. Возвращаясь к проблеме обеспечения геоэкологически

безопасного захоронения РАО в гранитогнейсовых породах Нижне-Канского массива, отметим, что исключительно важным является проведение детальной магнитной съемки участка Енисейский. Результаты такой съемки позволят выделить скрытые осадочным чехлом тектонические нарушения, которые необходимо учесть при прогнозе длительной тектонической стабильности геологической среды. Аэромагнитная съемка территории была выполнена в основном в 50–60-х гг. прошлого века. С тех пор аппаратная база аэромагнитной съемки была коренным образом обновлена.

Применение методов системного анализа для обоснования геоэкологически безопасной подземной изоляции РАО может существенно повысить эффективность использования огромного массива геолого-геофизических данных о геодинамике Нижне-Канского массива. Методы системного анализа позволяют как системно обобщить и проанализировать огромные массивы геопространственных данных, так и помочь найти новые инновационные подходы к изучению геодинамических процессов в верхней части земной коры.

Работа, относящаяся к Нижне-Канскому массиву, выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 18-17-00241 «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов».

### СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АПК – аппаратно-программный комплекс  
 ГНСС – глобальные навигационные спутниковые системы  
 ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система (Россия)  
 ДМА – дискретный математический анализ  
 ИНТЕРМАГНЕТ – International Real-Time Observatory Network  
 МПЗ – магнитное поле Земли  
 НДС – напряженно-деформированное состояние  
 ПГЗРО – пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов  
 ПИЛ – подземная исследовательская лаборатория

РАО – радиоактивные отходы  
 СТБ – структурно-тектонический блок земной коры  
 IAGA – Международная ассоциация геомагнетизма и аэрономии  
 IAG – Международная ассоциация геодезии  
 IGS – Международная служба ГНСС  
 GPS – глобальная навигационная спутниковая система (США)  
 SOPAC – Scripps Orbit and Permanent Array Center  
 UNAVCO – University NAVSTAR Consortium

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алпатов В.В., Лапшин В.Б., Репин А.Ю., Тасенко С.В.* Перспективы развития сети радиотомографии Росгидромета // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 5. С. 74–84.
- Андерсон Е.Б., Белов С.В., Камнев Е.Н., Колесников И.Ю., Лобанов Н.Ф., Морозов В.Н., Татаринов В.Н.* Подземная изоляция радиоактивных отходов. М.: изд-во «Горная книга». 2011. 592 с. ил. (АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА).
- Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р.* Определение аномалий на временных рядах методами нечеткого распознавания // Докл. РАН. 2008а. Т. 421. № 1. С. 101–105.
- Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Злотники Ж., Боннин Ж.* Математические методы геоинформатики III. Нечеткие сравнения и распознавание аномалий на временных рядах // Кибернетика и системный анализ. 2008б. Т. 44. № 3. С. 3–18.
- Гвишиани А.Д., Белов С.В., Агаян С.М., Родкин М.В., Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Богоутдинов Ш.Р.* Методы искусственного интеллекта при оценке тектонической стабильности Нижнеканского массива // Инженерная экология. № 2. 2008в. С. 3–14.
- Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю.* Исследование геомагнитного поля и проблемы точности бурения наклонно направленных скважин в Арктическом регионе // Горный журнал. 2015б. № 10. С. 94–99. doi: 10.17580/gzh.2015.10.17
- Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю.* Геоинформатика и наблюдения магнитного поля Земли: российский сегмент // Физика Земли. 2015а. № 2. С. 3–20. doi: 10.7868/S0002333715020040
- Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Татаринов В.Н.* Алгоритмическая кластеризация в оценке сейсмической опасности при размещении объектов ядерного топливного цикла. Международная научно-техническая конференция «Проблемы и решения в экологии горного дела». М. 2017. С. 42–48.
- Гохберг М.Б., Ольшанская Е.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л.* Ионосферный отклик на акустический сигнал от подводных землетрясений по данным GPS // Физика Земли. 2014. № 1. С. 3–10.



- Жеребцов Г.А.* (отв. ред.) Институт солнечно-земной физики: создание и развитие. Новосибирск: изд-во СО РАН. 2015. 160 с.
- Зелинский Н.Р., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Ага-ян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Соловьев А.А.* Алгоритм распознавания геомагнитных пульсаций Pс3 на секундных данных экваториальных обсерваторий сети ИНТЕРМАГНЕТ // Физика Земли. 2014. № 2. С. 91–99. doi: 10.7868/S0002333714020136
- Кафтан В.И., Красноперов Р.И.* Геодезические наблюдения на геомагнитных обсерваториях // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 1. С. 123–129. doi: 10.7868/S001679401501006X
- Кафтан В.И., Красноперов Р.И., Тертышников А.В.* Наблюдения с использованием глобальных навигационных систем на геомагнитных станциях и обсерваториях: прикладные и глобальные аспекты // Гелиогеофизические исследования. 2015. Вып. 12. С. 1–10.
- Кафтан В.И., Мельников А.Ю.* Выявление деформационных аномалий по данным ГНСС наблюдений в связи с подготовкой и разрядкой крупных землетрясений // Физика Земли. 2018. № 1. С. 26–36. doi: 10.7868/S0002333718010027
- Кафтан В.И., Сидоров В.А., Устинов А.В.* Сравнительный анализ точности локального мониторинга движений и деформаций земной поверхности с использованием глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС // Вулканология и сейсмология. 2017. № 3. С. 50–58. doi: 10.7868/S020303061703004X
- Кафтан В.И., Устинов А.В.* Применение глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга деформаций гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2012. № 12. С. 11–19.
- Квейд Э.* Анализ сложных систем / под ред. И.И. Андреева, И.М. Верещагина. М.: Советское радио. 1969. 520 с.
- Красноперов Р.И., Сидоров Р.В., Соловьев А.А.* Современные геодезические методы высокоточной привязки геофизических съемок на примере магниторазведки // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 4. С. 568–576. doi: 10.7868/S0016794015040070
- Кусонский О.А.* Геофизические обсерваторские исследования на Урале. Екатеринбург: РИО УрО РАН. 2012. 280 с.
- Перевалова Н.П., Шестаков Н.В., Воейков С.В., Быков В.Г., Герасименко М.Д., Парк Р.Н.* Исследование распространения ионосферных возмущений, вызванных землетрясением Tohoku, в дальней от очага зоне. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 186–196.
- Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Красноперов Р.И., Груднев А.А., Хохлов А.В.* Новая геомагнитная обсерватория «Климовская» // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56. № 3. С. 365–379. doi: 10.7868/S0016794016030160
- Соловьев А.А., Хохлов А.В., Жалковский Е.А., Березко А.Е., Лебедев А.Ю., Харин Е.П., Шестопалов И.П., Манда М., Кузнецов В.Д., Бондарь Т.Н., Нечитайленко В.А., Рыбкина А.И., Пятыхина О.О., Шibaева А.А.* Атлас магнитного поля Земли / под ред. Гвишиани А.Д., Фролова А.В., Лапшина В.Б. М.: ГЦ РАН. 2012. 364 С. doi: 10.2205/2012Atlas\_MPZ
- Татаринов В.Н.* Геодинамическая безопасность на объектах ядерного топливного цикла // Использование и охрана природных ресурсов в России. Бюллетень № 1 (85). 2006. С. 46–51.
- Татаринов В.Н.* Системный подход к оценке геоэкологической безопасности объектов ядерного топливного цикла. Материалы IV Международной научно-практической конференции «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных геоинформационных технологий». Часть 2. Майкоп: изд-во «ИП Кучеренко В.О.» 2017. С. 173–182.
- Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Permyakova V.E., Steblov G.M., Shalimov S.L.* Variations of the total electron content in the ionosphere from GPS data recorded during the Hector Mine earthquake of October 16, 1999, California // Russian Journal of Earth Sciences. 2004. V. 6. № 5. P. 339–354.
- Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Krasnoperov R.I.* Short introduction into DMA // Russian Journal of Earth Sciences. 2018. V. 18. № 2. ES2001. doi: 10.2205/2018ES000618
- Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., and Xavier C.* ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2016. P. 121. doi: 10.1002/2016JB013098
- Bock Yehuda, Kedar Sharon, Moore Angelyn W., Fang Peng, Geng Jianghui, Liu Zhen, Melgar Diego, Owen Susan E., Squibb Melinda B., Webb Frank.* Twenty-Two Years of Combined GPS Products for Geophysical Applications and a Decade of Seismogeodesy. In book: International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH), International Association of Geodesy Symposia, Springer International Publishing. Switzerland. 2016. doi: 10.1007/1345\_2015\_220
- Buchanan A., Finn C.A., Love J.J., Worthington E.W., Lawson F., Maus S., Okewunmi S., Poedjono B.* Geomagnetic Referencing... The Real-Time Compass for Directional Drillers // Oilfield Review. 2013. V. 25. № 1. P. 32–47.
- Carter B.A., Kellerman A.C., Kane T.A., Dyson P.L., Norman R., Zhang K.* Ionospheric Precursors to Large Earthquakes: A Case Study of the 2011 Japanese Tohoku Earthquake // Journal of Atmospheric and Solar. Terrestrial Physics. 2013. V. 102. P. 290–297. doi: 10.1016/j.jastp.2013.06.006
- Chulliat A., Anisimov S.* The Borok INTERMAGNET magnetic observatory // Russ. J. Earth. Sci. 2008. V. 10. ES3003. doi: 10.2205/2007ES000238
- GFZ, Helmholtz Centre Potsdam. 2018 Indices of Global Geomagnetic Activity. Available at: <http://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>
- Gvishiani A., Lukianova R., Soloviev An., Khokhlov A.* Survey of Geomagnetic Observations Made in the Northern Sector of Russia and New Methods for Analysing Them // Surveys in Geophysics. 2014. V. 35. № 5. P. 1123–1154. doi: 10.1007/s10712-014-9297-8
- Gvishiani A., Soloviev A., Krasnoperov R., Lukianova R.* Automated Hardware and Software System for Monitoring

- the Earth's Magnetic Environment // Data Science Journal. 2016. V. 15, № 18, P. 1–24. doi: 10.5334/dsj-2016-018
- Gvishiani A.D., Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Mikhailov V.O., Tatarinov V.N.* Fuzzy sets algorithms of time-space analysis of geological, geophysical and geodynamic databases. II International Conference “GIS in Geology”. 2004a. Moscow, Vernadsky SGM RAS. Russia. 2004a. P. 41–42.
- Gvishiani A.D., Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Tikhotsky S.A., Hinderer J., Bonnin J., Diamant M.* Algorithm FLARS and recognition of time series anomalies // System Research & Information Technologies. 2004b. №. 3. P. 7–16.
- Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., Orus R., García-Rigo A., Feltens J., Komjathy A., Schaer S.C., Krankowski A.* The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. Journal of Geodesy. 2009. V. 83. P. 263. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0266-1>
- Hobiger T., Jakowski J.* Atmospheric Signal Propagation. In book: Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. 2017. doi: 10.1007/978-3-319-42928-1\_6
- INTERMAGNET 2013c List of IMOs and responsible GINs. Available at: <http://intermagnet.org/imos/imotblobs-eng.php>
- Jankowsky J., Sucksdorff C.* Guide for magnetic measurements and observatory practice. Warsaw: IAGA, 1996. 238 p.
- Kaftan V., Melnikov A.* Local Deformation Precursors of Large Earthquakes Derived from GNSS Observation Data. IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2017. 95(3):032030. doi: 10.1088/1755-1315/95/3/032030
- Kaftan V.I., Ustinov A.V.* Use of global navigation satellite systems for monitoring deformations of water-development works // Power Technology and Engineering. 2013. V. 47. Is. 1. P. 30–37.
- Love J.J.* Magnetic monitoring of Earth and space // Physics Today. 2008. V. 61(2). P. 31–37. doi: 10.1063/1.2883907
- Love J.J., Chulliat A.* An International Network of Magnetic Observatories // Eos Trans. AGU, V. 94(42). 2013. P. 373–374. doi: 10.1002/2013EO420001
- Macmillan S.* Observatories, overview / D. Gubbins, E. Herrero-Bervera (eds.) Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism. New York: Springer, 2007. P. 711–713.
- Mandea M., and Papitashvili V.* Worldwide geomagnetic data collection and management. Eos, Transactions American Geophysical Union. 2009. V. 90(45). P. 409–424. doi: 10.1029/2009EO450001
- Matzka J., Chulliat A., Mandea M., Finlay C.C., Qamili E.* Geomagnetic Observations for Main Field Studies: From Ground to Space // Space Science Reviews. 2010. V. 155(1–4). P. 29–64. doi: 10.1007/s11214-010-9693-4
- Morozov V.N., Kolesnikov I. Yu., and Tatarinov V.N.* Modeling the Hazard Levels of Stress-Strain State in Structural Blocks in Nizhnekanskii Granitoid Massif for Selecting Nuclear Waste Disposal Sites // Water Resources. 2012. V. 39, Is. 7. P. 756–769. <http://link.springer.com/journal/11268#page-1>. DOI:10.1134/S009780781207007X
- Olsen N., Friis-Christensen E., Floborghagen R., Alken P., Beggan C.D., Chulliat A., Doornbos E., da Encarnação J.T., Hamilton B., Hulo G., van den IJssel J., Kuvshinov A., Lesur V., Lühr H., Macmillan S., Maus S., Noja M., Olsen P.E.H., Park J., Plank G., Püthe C., Rauberg J., Ritter P., Rother M., Sabaka T.J., Schachtschneider R., Sirol O., Stolle C., Thébaud E., Thomson A.W.P., Toffner-Clausen L., Velínský J., Vigneron P., Visser P.N.* The Swarm satellite constellation application and research facility (SCARF) and swarm data products // Earth, Planets and Space. 2013. V. 65(11). P. 1189–1200. doi: 10.5047/eps.2013.07.001
- Pirjola R.* Geomagnetically Induced Currents as Ground Effects of Space Weather. Space Science. Dr. Herman J. Mosquera Cuesta (Ed.). InTech. 2012.
- Reay J., Herzog D., Sobhana A., Kharin E., McLean S., Nose M., Sergeeva N.* 2011 Magnetic observatory data and metadata: types and availability. Mandea M, Korte M (eds.) Geomagnetic Observations and Models. The Netherlands: Springer Science+Business Media B.V. 2011. P. 149–181. doi: 10.1007/978-90-481-9858-0
- Roberts F.S.* What is Big Data and how has it changed? / Book of Abstracts of the International Conference ‘Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies’. Sochi region. Mountain cluster. Russia. 18–21 July 2016. BS4002. doi: 10.2205/2016BS01Sochi
- Sapunov V.A., Denisov A.Y., Saveliev D.V., Soloviev A.A., Khomutov S.Y., Borodin P.B., Narkhov E.D., Sergeev A.V., Shirokov A.N.* New vector/scalar Overhauser DNP magnetometers POS-4 for magnetic observatories and directional oil drilling support // Magnetic Resonance in Solids. Electronic Journal. 2016. V. 18. № 2. 16209, 9 p.
- Shuanggen Jin, Attila Komjathy.* GNSS Reflectometry and Remote Sensing: New Objectives and Results Advances in Space Research. 2010. V. 46. P. 111–117 doi: 10.1016/j.asr.2010.01.014
- Sidorov R., Soloviev A., Krasnoperov R., Kudin D., Grudnev A., Kopytenko Y., Kotikov A., Sergushin P.* Saint Petersburg magnetic observatory: from Voeikovo subdivision to INTERMAGNET certification // Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems. 2017. V. 6. № 2. P. 473–485. doi: 10.5194/gi-6-473-2017
- Soloviev A., Agayan S., Bogoutdinov S.* Estimation of geomagnetic activity using measure of anomalousness // Annals of Geophysics. 2016. V. 59 (6). doi: 10.4401/ag-7116
- Soloviev An., Chulliat A., Bogoutdinov S., Gvishiani A., Agayan S., Peltier A., Heumez B.* Automated recognition of spikes in 1 Hz data recorded at the Easter Island magnetic observatory // Earth Planets Space. 2012. V. 64. № 9. P. 743–752. doi: 10.5047/eps.2012.03.004
- Steblov G.M., Starovoit O.E.* North Eurasia GPS Deformation Array (NEDA). Proc. Int. Seminar On the use of Space Techniques for Asia-Pacific Regional Crustal Movements Studies. Irkutsk. August 5–10. 2002. M.: GEOS. 2002. P. 85–96.
- St-Louis B., Sauter E.A., Trigg D.F., Coles R.L., Regimbaldo D.* INTERMAGNET Technical Reference Manual, Version 4.6. 2012. Edinburgh: INTERMAGNET. 2012. 100 p.
- Tatarinov V.N., Kaftan V.I., Seleev V.N.* Study of present-day geodynamics of the Nizhnekansmisk massif for safe disposal of radioactive wastes // Atomic Energy. 2017. P. 1–5.

## Geoinformatics and Systems Analysis in Geophysics and Geodynamics

**A. D. Gvishiani<sup>a,b,\*</sup>, V. I. Kaftan<sup>a,c,\*\*</sup>, R. I. Krasnoperov<sup>a,\*\*\*</sup>,  
V. N. Tatarinov<sup>a,b,\*\*\*\*</sup>, and E. V. Vavilin<sup>a,\*\*\*\*\*</sup>**

<sup>a</sup>*Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296 Russia*

<sup>b</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

<sup>c</sup>*People's Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, 117198 Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: a.gvishiani@gcras.ru*

<sup>\*\*</sup>*e-mail: v.kaftan@gcras.ru*

<sup>\*\*\*</sup>*e-mail: r.krasnoperov@gcras.ru*

<sup>\*\*\*\*</sup>*e-mail: v.tatarinov@gcras.ru*

<sup>\*\*\*\*\*</sup>*e-mail: v.vavilin@gcras.ru*

Received June 20, 2018

The paper is devoted to the application of geoinformatics and systems analysis methods for processing and interpretation of geospatial data in geophysics and geodynamics. The modern uses of observations with Global Navigational Satellite Systems as a main source of geospatial data are discussed. The advances in the interpretation of geomagnetic data are described and basic points of systems analysis are presented in this context. The systems analysis in geophysics and geodynamics is illustrated by the approaches to estimating and forecasting the stability of structural-tectonic blocks of the Earth's crust aimed at geologically safe burial of high-level radioactive waste in the Nizhne-Kanskii granitoids massif (Krasnoyarsk krai).

*Keywords:* systems analysis, geologically safe burial of radioactive waste, geospatial data