

## ИННОВАЦИИ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

### ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР И ОПАСНЫХ СЕЙСМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**В.А. Петров**, зам. дир. Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), докт. геол.-мин. наук, чл.-корр. РАН, [vlad243@igem.ru](mailto:vlad243@igem.ru)

**А.Н. Платэ**, вед. научн. сотр. Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), канд. геогр. наук, [plate@igem.ru](mailto:plate@igem.ru)

**А.Б. Лексин**, вед. програм. инж. Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), [lexin@igem.ru](mailto:lexin@igem.ru)

*В статье речь идет о создании информационно-аналитической платформы для изучения внешних причин возникновения техногенных аварий и совершенствования методов их прогнозирования и предотвращения. Основным инструментом прогнозирования опасных природно-техногенных явлений и снижения рисков их возникновения является трехмерное моделирование активных геологических структур и опасных сейсмогеодинамических процессов на основе ГИС технологий на примере Юго-Восточного Забайкалья – одного из ключевых районов добычи стратегических видов минерального сырья в России.*

**Ключевые слова:** активные геологические структуры, опасные сейсмогеодинамические процессы, напряженно-деформированное состояние пород, база данных, геоинформационная система, трехмерное моделирование, месторождения стратегического сырья, мониторинг природно-техногенных явлений, Юго-Восточное Забайкалье.

### THREE-DIMENSIONAL MODELING OF GEOLOGICAL STRUCTURES AND HAZARDOUS SEISMOGEOLOGICAL PROCESSES ON THE BASIS OF GEOINFORMATION TECHNOLOGIES

**V.A. Petrov**, Deputy Director, Institute of ore deposits geology, petrography, mineralogy and geochemistry of Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Ph. D., Corresponding Member of RAS, [vlad243@igem.ru](mailto:vlad243@igem.ru)

**A.N. Plate**, Leading Researcher, Institute of ore deposits geology, petrography, mineralogy and geochemistry of Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Doctor of Geography, [plate@igem.ru](mailto:plate@igem.ru)

**A.B. Leksin**, Leading Software Engineer, Institute of ore deposits geology, petrography, mineralogy and geochemistry of Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), [lexin@igem.ru](mailto:lexin@igem.ru)

*In the article it is a problem of creation of an information-analytical platform for investigation of external reasons for anthropogenic accidents and improving methods of their forecasting and prevention. The main tool for forecasting hazardous natural and anthropogenic phenomena and mitigating risks of their originating is three-dimensional modeling of active geological structures and hazardous seismogeodynamic processes on the basis of GIS-technologies with southeastern*

*Transbaikalia as an example, as one of the key areas for mining of strategic raw minerals in Russia.*

**Keywords:** active geological structures, hazardous seismogeodynamical processes, stressed-strained state of rocks, database, geoinformation system, tridimensional modeling, deposits of strategic mineral resources, monitoring of natural and technogenic phenomena, southeastern Transbaikalia.

### **Введение**

Исследования, о которых пойдет речь в данной статье, направлены на решение важнейшей научной проблемы – раскрытие закономерностей развития современных геодинамических процессов и сеймотектонических явлений, которые внезапно проявляются и создают предпосылки для техногенных аварий на территориях размещения объектов повышенного экологического и радиационного риска (шахтные поля, радиохимические предприятия, пункты изоляции отработанных ядерных материалов, плотины, газо- и нефтепроводы и т. д.). Решение этой научной проблемы осуществляется на основе информационно-аналитического комплекса трехмерного моделирования активных геологических структур и прогноза их напряженно-деформированного состояния, созданного с использованием ГИС технологий на примере территории Юго-Восточного Забайкалья.

### **Актуальность научной проблемы**

Ускоренное развитие экономического потенциала страны, в том числе в горнодобывающей промышленности, атомной энергетике, строительстве, происходит на фоне расширения масштабов аномальных природных явлений [14]. Они могут быть практически мгновенными, как при землетрясении, или инициироваться весьма продолжительными изменениями региональной геодинамической обстановки [12]. Антропогенное вмешательство в природную среду вызывали и могут вызвать в будущем техногенные аварии [4, 1, 7] с перерастанием их в экологические катастрофы. Все это предъявляет дополнительные требования к иному уровню развития научного знания в этой области.

Наиболее актуален вопрос предотвращения или минимизации последствий природных и техногенных катастроф для таких объектов повышенной техногенной и экологической опасности, как шахтные поля, радиохимические предприятия, пункты изоляции отработавших ядерных материалов, плотины, газо- и нефтепроводы и т. д. Для этих объектов необходимо на единой геоинформационной платформе с применением новейших методов комплексных геолого-геофизических изысканий провести оценку современной геодинамической активности территории, выделить сейсмоактивные разломные зоны, установить закономерности влияния природной составляющей напряженного состояния недр на характер протекания локальных техногенных процессов. С учетом специфики геолого-тектонического строения территории должна разрабатываться структура сети мониторинга сейсмогеодинамических процессов на многофункциональных геодинамических полигонах [2, 10, 9]. Проведенные на полигонах наблюдения формируют информационную основу для прогнозирования состояния литосферы, принятия решений по рациональному недропользованию и обеспечению экологической безопасности территории.

Например, большинство крупных и уникальных месторождений стратегических и крайне востребованных промышленностью видов минерального сырья (уран, золото, редкие металлы и др.) в геологическом прошлом формировались в активизированных подвижных поясах на границах литосферных блоков [6, 13]. В настоящее время эти глобальные шовные зоны характеризуются интенсивной тектонической нарушенностью и сейсмической активностью. Поэтому расположенные здесь горнодобывающие предприятия являются объектами повышенной техногенной и экологической опасности.

Техногенная опасность определяется тем, что в условиях увеличения выработанного пространства и перемещения фронта добычных работ на глубокие горизонты геологического разреза активизируются проявления горного давления. На фоне изменения напряженного состояния массива пород это нередко приводит к горно-тектоническим ударам (техногенным землетрясениям) большой разрушительной силы. В результате горнорудные предприятия вынуждены сворачивать или полностью останавливать работы. В условиях, когда предприятие является градообразующим, это многократно усиливает негативные социально-экономические риски и последствия.

Экологическая опасность обуславливается тем, что при переработке рудной массы образуется огромное количество химически активных отходов, размещаемых в открытых горных отвалах и хвостохранилищах. Нарушение целостности этих объектов в результате природно-техногенных деформаций сопровождается выносом загрязнителей (радионуклиды, тяжелые металлы) и заражением ими горизонтов подземных вод, использующихся для водоснабжения населения, а также деградацией всей экосистемы.

Базовые условия для улучшения технологий наблюдения, оценки и прогнозирования опасных сейсмогеодинамических явлений в России имеются. За предыдущие десятилетия организация сетей мониторинга деформаций блоков литосферы стала одним из важнейших инструментов в решении фундаментальных и прикладных задач, имеющих особое значение для народного хозяйства и обеспечения безопасности страны. Эти данные нашли отражение в Комплексе карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97 [5] и дополнены в рамках создания ОСР-2012. Примером служит созданная в конце XX века система постоянных и временных станций наблюдения «Байкальского геодинамического полигона», который охватывает Южное Прибайкалье, Восточные Саяны, Туву, Центральную и Западную Монголию [11, 8]. Результаты исследований на этой территории во многом способствовали принятию решения об изменении маршрута нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан» в сторону от Байкальской рифтовой зоны, в пределах которой интенсивно проявлена современная сейсмическая активность.

В последнее время поиск путей снижения риска возникновения и уменьшение последствий катастроф природного и техногенного происхождения привлекают пристальное внимание научного сообщества, например Международной ассоциации математической геологии (IAMG). В большинстве государственных и частных исследовательских институтов созданы специализированные группы и лаборатории, в инструментарий которых входят геоинформационные системы. Однако их работа связана в основном с подготовкой картографических материалов для решения вопросов рационального природопользования. Специализированных групп, развивающих концепции и направления в области трехмерного моделирования активных геологических структур и прогноза развития опасных сейсмогеодинамических процессов с использованием ГИС технологий для решения фундаментальных и прикладных задач в области прогнозирования чрезвычайных ситуаций и снижения рисков их возникновения, явно недостаточно. В немалой степени это объясняется сложностью интегрирования расчетных геодинамических (тектонофизических) моделей в ГИС и получения представительных данных без детального трехмерного анализа геолого-тектонического строения и геофизических полей изучаемых территорий.

Юго-Восточное Забайкалье исторически является важнейшим поставщиком стратегических видов минерального сырья для нужд экономики страны, включая золото, уран, медь, редкие металлы. С принятием Федерального закона от 29.12.2014 № 473-ФЗ «О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации» эта территория привлекает к себе пристальное внимание как один из ключевых регионов обеспечения минерально-сырьевой базы (МСБ) стратегического сырья для развития высоких технологий и импортозамещения.

Однако дальнейшие перспективы развития МСБ связаны здесь с ведением работ на глубоких горизонтах длительно обрабатываемых месторождений в усложняющихся горно-геологических условиях. Ввод в строй новых крупных месторождений во многом сдерживается тем, что до настоящего времени на данной территории не изучены вопросы внешних природных причин и источников, определяющих локальные горно-геологические условия и уровень опасности возникновения техногенных аварий. К тому же ряд районов Юго-Восточного Забайкалья рассматривается в качестве потенциально благоприятных для строительства приповерхностного пункта хранения радиоактивных отходов и объекта по долгосрочной изоляции ядерных материалов в глубокозалегающих формациях [3].

Необходимость разработки методов и средств прогнозирования чрезвычайных ситуаций и снижения рисков их возникновения для Юго-Восточного Забайкалья обусловлена, в частности, тем, что при относительно хорошей геолого-геофизической и металлогенической изученности, данная территория не обеспечена системой наблюдений за развитием современных сейсмогеодинамических процессов. Поэтому расположенные здесь многочисленные горнодобывающие, горноперерабатывающие и радиохимические предприятия являются объектами повышенного экологического риска. Отсутствие прогнозной составляющей в определении динамики развития сейсмогеодинамических процессов в районах промышленной деятельности создает серьезные препятствия для разработки и реализации мероприятий по предотвращению или уменьшению последствий природных катастроф и техногенных аварий.

Таким образом, для территории Юго-Восточного Забайкалья с учетом специфики ее геолого-тектонического строения и неоднородности геофизических полей необходимо создать информационно-аналитический комплекс трехмерного моделирования активных геологических структур и прогноза развития опасных сейсмогеодинамических процессов с использованием ГИС технологий. Примером подобного рода комплексов, объединяющих картографические и геофизические данные по глубинному строению сейсмогенерирующих структур и оценке их сейсмической опасности, является проект World Stress Map. Это глобальная ГИС, которая в настоящее время включает по всему миру более 22000 точек постоянных и временных наблюдений за деформациями литосферы [16]. Однако этот проект не охватывает юго-восточного Забайкалья и получаемые в его рамках данные не могут быть использованы для анализа и оценки современной сейсмогеодинамической активности территории.

Информационно-аналитический комплекс трехмерного моделирования активных геологических структур Юго-Восточного Забайкалья, платформой которого является ГИС, способен интегрировать:

- территориально централизованную и тематически распределенную базу геолого-геофизических данных;
- двумерные и трехмерные модели литосферных блоков с распределением элементов тектонического строения и сейсмогенерирующих структур;
- числовые двумерные и трехмерные модели современного напряженно-деформированного состояния массивов пород и активных разломных зон.

Информационно-аналитический комплекс позволит локализовать зоны развития опасных сейсмогеодинамических процессов и произвести их точное позиционирование на местности в части пространственно-временной приуроченности областей генерации напряжений к конкретным геологическим структурам для дальнейшего определения пунктов мониторинга, в том числе с использованием космогеодезических данных.

Это создаст научную основу для количественной оценки и прогнозирования состояния литосферы, направленные на снижение риска возникновения и уменьшение последствий катастроф природного и техногенного происхождения, а также на принятие решений по рациональному недропользованию и обеспечению экологической безопасности народнохозяйственных объектов на территории юго-восточного Забайкалья.

Наряду с этим станет возможным обеспечение современного информационного обслуживания специалистов, выполняющих фундаментальные, поисковые и прикладные исследования в области наук о Земле и рационального природопользования. Помимо справочной (метаинформация) и документальной информации в разработанной информационном комплексе накапливаются и могут предоставляться пользователям полные (первичные) сведения об изучаемых объектах и процессах: фактографические базы данных, электронные таблицы, цифровые карты, специализированные географические информационные системы, аэро- и космоснимки, сведения о научно-измерительной базе и др. Исследователи, работники сфер управления и производства с помощью ГИС-системы могут получать оперативный многоуровневый доступ к информационным ресурсам и технологиям современных центров научной информации, глобальных информационных и вычислительных сетей. Для этого пользователю предоставляется соответствующий интерфейс к средствам решения определенной научной задачи и типового описания выполнения пользовательских заданий.

### **Современное состояние и методика исследований**

В настоящее время основными направлениями исследований по проблеме изучения внешних природных причин возникновения техногенных аварий и совершенствования методов их прогнозирования и предотвращения в мировой науке являются:

- развитие многофункциональных и проблемно-ориентированных ГИС и перспективных интеллектуальных экспертных систем;
- развитие методов прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера на количественной основе.

В связи с этим происходит динамичное развитие:

- технологий сбора и обработки данных для интегрированных информационных ресурсов на базе глобальной сети Интернет (Web), технологий сетевых аналитических геоинформационных систем (GIS) и технологий распределенных вычислительных сетей (GRID);
- технологий пространственно-временного моделирования различных природных и техногенных процессов и явлений;
- технологий информационного обслуживания и обеспечения оперативного многоуровневого доступа к информационным ресурсам.

Создание геоинформационных систем, в которых реализована возможность отображения пространственных данных в трехмерном виде (3D ГИС), является инновационным направлением работ в информатике. Основное назначение трехмерных ГИС – формирование визуальных моделей, в первую очередь, крупномасштабных объектов. Трехмерная информация об объектах используется для контроля и управления со стороны человека-оператора, т.е. модель является источником данных. На основе отображаемой информационной модели у оператора формируется концептуальная модель. Трехмерная информационная модель обеспечивает наибольшую полноту концептуальной модели и ее адекватность отображаемым объектам, которые в большинстве случаев являются объемными. Необходимость формирования трехмерной информационной модели возникает при изучении рельефа местности, трехмерной структуры геологических и археологических объектов с помощью ГИС, дистанционном управлении манипуляторами, автоматическими исследовательскими аппаратами и т.д. В ряде случаев, например, когда один отображаемый объект заслоняется другим, возникает необходимость в рассмотрении объемного изображения с различных сторон, т.е. требуется формирование многокурсной трехмерной информационной модели.

Методы, технические средства и разнообразные продукты трехмерной визуализации геолого-тектонического строения территорий на основе ГИС в настоящее время приобретают все большую роль для изучения глубинного строения сейсмогенерирующих структур, оценки их напряженно-деформированного состояния, сейсмической опасности – данных, кото-

рые необходимы для принятия решений о целесообразности проведения тех или иных мероприятий на конкретной территории.

В этом контексте наиболее яркими примерами реализации являются:

– упомянутый ранее проект World Stress Map (WSM) – глобальная информационная система по напряженному состоянию земной коры (информационный ресурс [www.world-stress-map.org](http://www.world-stress-map.org)). Проект стартовал в 1986 г. как часть международной программы по литосфере (International Lithosphere Program, ILP), с 1995 по 2008 г. являлся проектом Гейдельбергской академии (Heidelberg Academy of Sciences and Humanities), а с 2009 г. реализуется в Helmholtz Centre Potsdam – GFZ German Research Centre for Geosciences, Германия. В настоящее время проект WSM объединяет более 22000 точек постоянных и временных наблюдений за деформациями литосферы по всему миру. Эта глобальная информационная система постоянно пополняется. Отраженные в ней материалы используются для решения большого спектра научно-практических задач;

– совместная программа CHAMP (Satellites like Challenging Mini-satellite Payload), GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) и COGE (Gravity Field and steady state Ocean Circulation Explorer) по изучению гравитационных и магнитных полей Земли из космоса. Эта программа стартовала в 2007 г. Для достижения программных целей была организована специальная структура – Германская Геонаучная Исследовательская и Внедренческая Программа «Geotechnologien» (информационный ресурс [www.geotechnologien.de](http://www.geotechnologien.de)), совместно финансируемая Федеральным министерством образования и исследований (BMBWF) и Германским научным фондом (DFG) с дополнительным финансированием со стороны частных инвесторов;

– проект гравиметрических измерений Международного Гравиметрического Бюро (BGI, Тулуза, Франция). Этот проект объединяет все накапливаемые в мире данные по гравиметрии, которые размещены на информационном ресурсе [www.bgi.obs-mip.fr](http://www.bgi.obs-mip.fr). Материалы проекта также используются для решения различных научных и практических задач.

Среди отечественных центров следует отметить компанию «НЕОЛАНТ», которая сегодня является лидером в развитии современных информационных технологий, создавая решения на платформах Autodesk, Oracle, Bentley, DocsVision, ESRI, Hewlett-Packard, IBM, Intergraph, MapInfo, Microsoft, OpenText, Wonderware.

Наряду с этим отметим, что ни один из отечественных или зарубежных разработчиков не реализует задач по изучению и прогнозированию закономерностей развития современных геодинамических процессов и сейсмотектонических явлений для объектов повышенной техногенной и экологической опасности на основе интегрирования результатов фундаментальных и прикладных исследований, объединенных в геоинформационно-аналитический, геоструктурно-тектонический и расчетный геодеоформационный блоки. В такой постановке вопрос формулируется впервые.

Необходимо упомянуть и основных мировых научных конкурентов в области совершенствования методов прогнозирования и предотвращения техногенных аварий. Тенденции рынка наукоемкой продукции таковы, что разработками трехмерных ГИС разных типов на сегодняшний день занимается множество компаний, в том числе: Alioscopy, Apple, 3D Icon, Dimension Technologies Inc., Fraunhofer HHI, Holografika, i-Art, NewSight, StereoPixel, DDD, SeeFront, SeeReal Technologies, Spatial View Inc., Tridelity, VisuMotion, Zero Creative (xyZ).

Ведущей компанией считается компания Toshiba, которая оснащает компьютеры 3D-дисплеями, которые не требуют специальных очков. Новая технология использует тонкие линзы на передней части дисплея. Они разделяют изображение от экрана и направляют его на 9 опорных точек перед ТВ (когда пользователь смотрит хотя бы в одну из них, то у него создается впечатление трехмерности). Однако трехмерность изображения сохраняется лишь для сравнительно узкого угла обзора (не более 50 градусов). Научно-исследовательские разработки в этом направлении продолжают.

Рядом специализированных Институтов и организаций за рубежом систематически выполняется анализ ситуации в области пространственно-временного моделирования сейсмогеодинамических процессов, долгосрочного прогнозирования состояния геологической среды, оценки риска возникновения и последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Разрабатываются оптимальные стратегии и технологии обработки информационных потоков. Проводится сравнение различных технологий пространственно-временного (2D, 3D и 4D) моделирования опасных сейсмогеодинамических процессов. По специализированным научно-методическим материалам создаются ГИС-системы районирования территорий по признакам сейсмической опасности и 3D-моделирования сейсмических и активных геодинамических процессов. Производится теоретическое (математическое) обоснование повышения информационной пропускной способности 3D (в координатном пространстве) визуальных моделей и разрабатываются технологии 3D-визуализации моделей, подобные технологии IMAX 3D.

Одним из признанных лидеров в 2D-, 3D- и 4D-моделировании сложных геологических структур является компания Paradigm, которая реализовала новую технологию (UVT Transform) геологического моделирования. Технология обеспечивает переход к беспилларной реализации сеточных моделей, что позволяет проводить синтез геолого-геофизической информации.

Одним из лидеров в концептуальном моделировании для прогнозных целей (полуколичественное описание геодинамических процессов и явлений, приводящих к формированию месторождений различных полезных ископаемых) на ГИС-основе является Центр определения разведочных целей (Centre for Exploration Targeting) при Университете Западной Австралии, г. Кроули. Здесь при поддержке горнодобывающих компаний создан центр анализа геолого-геофизических данных, объединяемых в ГИС-проекты, для прогнозной оценки территорий, в том числе сейсмоопасных, направленной на снижение технических и финансовых рисков, связанных с их освоением.

В последнее время вопросы оптимизации взаимодействия общества с окружающей средой и рационального использования природных ресурсов, проблемы экологической безопасности привлекают пристальное внимание научного сообщества, например, Международной ассоциации математической геологии. Эта организация ориентирована на развитие геостатистических и геопространственных подходов к характеристике природных ресурсов и прогнозу состояния окружающей среды. В этом контексте за рубежом в большинстве государственных и частных исследовательских институтов созданы специализированные группы и лаборатории, в инструментарий которых входят геоинформационные системы. Их работа связана в основном с подготовкой картографических материалов для решения вопросов природопользования в части разграничения прав собственности на природные ресурсы.

Однако специализированных групп, развивающих концепции и направления в области трехмерного моделирования геодинамики геологических структур и прогноза их напряженно-деформированного состояния с использованием ГИС-технологий для решения фундаментальных и прикладных задач в области рационального природопользования, крайне мало. В определенной степени это объясняется сложностью интегрирования расчетных геодинамических (тектонофизических) моделей в ГИС и получения представительных данных для моделирования без детального трехмерного анализа геолого-тектонического строения изучаемых территорий.

#### **Совершенствование методов прогнозирования и предотвращения техногенных аварий**

Конкретной задачей, решаемой в рамках проблемы изучения внешних природных причин возникновения техногенных аварий, которые проявляются на территориях размещения объектов повышенной техногенной и экологической опасности, является совершенствование методов их прогнозирования и предотвращения. Данная задача требует комплексного решения. Поэтому исследования интегрируются по трем основным блокам: геоинформаци-

онно-аналитическому, геоструктурно-тектоническому и расчетному геодеформационному, каждый из которых решает свои задачи.

Блок геоинформационно-аналитических исследований решает задачу создания единой геоинформационной платформы работ, включая систематизацию всех доступных геологических, геофизических, геодинамических, тектонических, металлогенических, гидрографических и других данных по Юго-Восточному Забайкалью. Это обеспечивается путем создания распределенной базы геоданных в виде атрибутивных таблиц и тематических слоев картографических материалов с растровыми и векторными изображениями (топографические, геологические, тектонические, гидрогеологические, металлогенические и другие карты в масштабах от 1:500 000 до 1:200 000), привязанными к единой системе координат.

Блок геоструктурно-тектонических исследований решает задачу создания каркаса разломной тектоники юго-восточного Забайкалья, выявления особенностей геологического развития массивов горных пород, выделения основных этапов тектогенеза, районирования территории по степени геодинамической активности. Кроме того, осуществляется оценка направленности развития сейсмогеодинамических процессов, определение основных параметров напряженно-деформированного состояния массивов горных пород на месторождениях стратегических видов минерального сырья (уран, золото, полиметаллы, медь, редкие металлы и др.), где проявляются разрушительные природно-техногенные процессы.

Блок расчетных геодеформационных исследований решает задачу создания моделей строения, свойств и реологических связей геологической среды, определения граничных условий для числового тектонофизического моделирования опасных сейсмогеодинамических процессов, проведения 2D- и 3D-моделирования современного напряженно-деформированного состояния массивов пород с выделением активных разломов, интегрирования расчетных геодинамических моделей в геоинформационную систему Юго-Восточного Забайкалья.

Такая постановка вопроса изучения и оценки закономерностей развития современных геодинамических процессов и сеймотектонических явлений, которые проявляются на территориях размещения объектов повышенной техногенной и экологической опасности в Юго-Восточном Забайкалье по своему масштабу не имеет аналогов и является беспрецедентной.

Поставленная задача имеет все признаки оригинальности по двум основным обстоятельствам:

– впервые на геоинформационной основе устанавливаются внешние природные причины возможного возникновения аварий техногенного характера в обстановке «спокойной» геодинамики и современной «внутриплитной» сейсмичности;

– впервые расчетные трехмерные модели развития современных геодинамических процессов и опасных сеймотектонических интегрируются в территориальную геоинформационную систему.

Обоснование достижимости решения поставленной задачи по выявлению механизмов зарождения и развития областей сеймотектонической активности состоит в следующем. Известно, что основная сейсмическая активность концентрируется вдоль глобальных шовных зон, разделяющих стабильные литосферные плиты. Показательными примерами тому являются трансформный разлом Сан-Андреас между Тихоокеанской и Североамериканской плитами, проходящий вдоль побережья по территории штата Калифорния (США) на протяжении около 1300 км, а также Северо-Анатолийская зона разломов между Евразийской и Анатолийской плитами. Здесь по геологическим и космогеодезическим данным скорость современных сдвижений составляет 13–20 мм/год, но общая величина относительного перемещения плит достигает 30 мм/год за счет деформаций в приразломной полосе шириной более 100 км. Такие сейсмически активные структуры длительное время изучаются национальными и международными группами исследователей. Например, в зоне разлома Сан-



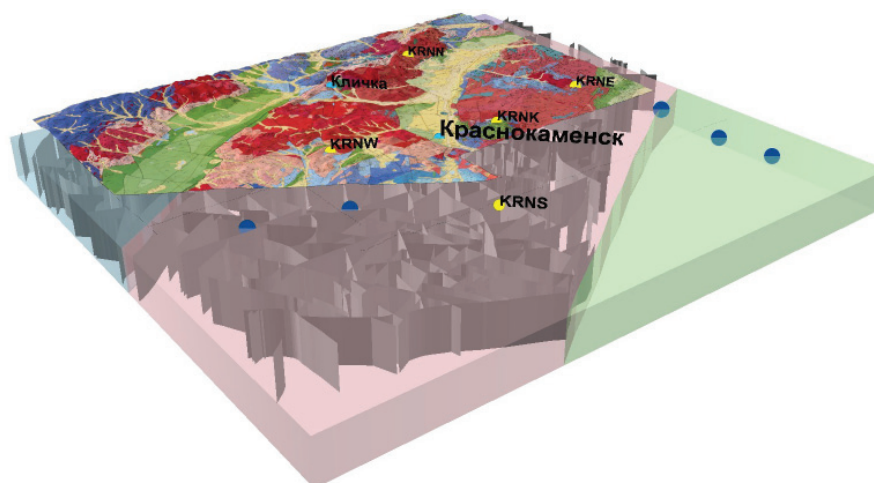
Андреас на площадке Паркфилд организована обсерватория (San Andreas Fault Observatory at Depth, SAFOD, информационный ресурс [www.safod.icdp-online.org](http://www.safod.icdp-online.org)), где под эгидой Геологической службы США проводятся геолого-геофизические исследования и создана система мониторинга сейсмической активности, деформаций и флюидной активности разлома [18]. Эта система организована в веере скважин, перебуривших зону основного сместителя разлома Сан-Андреас, и функционирует с 2004 г. [17].

Однако в последнее время все большее внимание специалистов привлекают, казалось бы, тектонически стабильные области внутри литосферных плит, где развита «внутриплитная» сейсмичность. Детальное и комплексное изучение феномена внутриплитной сейсмичности началось относительно недавно [15]. Примером является Нью-Мадридская сейсмическая зона на юго-востоке США, где зафиксированы исторические землетрясения, неоднократно приводившие к разрушениям и человеческим жертвам. Сейчас ее изучение обусловлено тем, что долина реки Миссисипи, которая протягивается на сотни километров вдоль этой зоны, густо населена. Специалисты констатируют, что в отличие от межблоковых литосферных границ, механизмы зарождения и развития сейсмических процессов внутри тектонически «пассивных» внутриплитных областей практически не изучены, что создает сложности в оценке сейсмической опасности для населения и объектов инфраструктуры в таких областях.

Нами предлагается подойти к решению вопроса о механизмах «внутриплитной сейсмичности» с геолого-структурных и геодинамических позиций. Предварительный анализ имеющихся по территории Юго-Восточного Забайкалья геолого-геофизических данных показывает, что области проявления современной сейсмической активности концентрируются в узлах пересечения разноориентированных региональных разломов, где начиная с мезозоя проявились процессы интенсивной флюидно-магматической проработки субстрата с формированием рудных узлов и месторождений стратегических видов минерального сырья (Стрельцовское урановорудное поле, Балейский золоторудный узел, Калгинский полиметаллический узел и др.). Представляется, что совмещение в пространстве областей мезокайнозойского рудогенеза и современной сейсмической активности имеет глубокие генетические корни. Вскрыть эти взаимосвязи возможно только с привлечением всех имеющихся геолого-геофизических данных.

Достижимость решения поставленной задачи по интегрированию расчетных трехмерных моделей развития современных геодинамических процессов и опасных сейсмотектонических явлений в геоинформационную систему Юго-Восточного Забайкалья обусловлена логикой развиваемого нами подхода, который включает следующие мероприятия. Сначала создается территориально централизованная и тематически распределенная база геолого-геофизических данных в виде атрибутивных таблиц и тематических слоев картографических материалов с растровыми и векторными изображениями (топографические, геологические, тектонические, геофизические, гидрогеологические, металлогенические и другие карты в масштабах от 1:500 000 до 1:200 000), которые привязаны к единой системе координат. Далее на этой основе формируются трехмерные модели геолого-тектонического строения и геодинамики региона, а затем создаются трехмерные модели каркаса разрывных нарушений и массивов пород различной формационной принадлежности и свойств (рис. 1).

На их основе с помощью специализированных программ методом конечных элементов проводится тектонофизическое моделирование полей современных напряжений и деформаций. Интегрирование расчетных моделей в ГИС-территории позволяет верифицировать результаты в непосредственном залегании пород в точках с конкретными географическими координатами, что дает возможность оценивать динамику развития опасных природно-техногенных явлений для конкретных геологических структур, их отдельных сегментов или участков. Такой подход к прогнозированию состояния окружающей среды реализуется впервые.



**Рис. 1. Пример трехмерной модели геолого-тектонического строения территории в районе гор. Краснокаменск (Юго-Восточное Забайкалье). KRNW, KRNK, KRNE, KRNS – пункты полигона GPS наблюдений за динамикой сдвижений земной поверхности. Синими точками показаны гипоцентры землетрясений после 2000 г.**

### **Заключение**

К основным результатам исследований, полученным в настоящее время, относятся:

– выбран рациональный набор технологий глобальной сети Интернет (Web), сетевых аналитических геоинформационных систем (GIS) и распределенных вычислительных сетей (GRID) для создания информационно-аналитического комплекса сбора, обработки и анализа большого массива неоднородных геолого-геофизических данных для определения закономерностей развития современных геодинамических процессов и сеймотектонических явлений, создающих предпосылки для техногенных аварий на территориях размещения объектов повышенного экологического риска;

– определены оптимальные стратегии обработки информационных потоков и разработаны методы, реализующие преимущества высокопроизводительных технологий обработки, концентрации и распределения цифровых данных в сочетании с программными средствами подготовки научно-методических материалов автоматизированного анализа пространственной привязки документографических массивов информации интегрированного банка данных в областях наук о Земле и рационального природопользования;

– на примере Юго-Восточного Забайкалья выполнены экспериментальные режимы работы по технологии автоматизированного создания в ГИС распределенного проблемно-ориентированного информационного поля с привлечением гетерогенных мониторинговых данных.

### **Список литературы**

1. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре. М.: ИНЭК, 2005. 252 с.
2. Бортников Н.С., Петров В.А., Веселовский А.В. и др. Геоинформационная система (ГИС) забайкальского сектора Монголо-Охотского подвижного пояса // Руды и металлы. 2012. № 3. С. 18–27.
3. Интернационализация ядерного топливного цикла: цели, стратегии и проблемы / Под ред. Д.Ф. Ахерна и Н.П. Лаверова. Washington, DC: The National Academies Press, USA. 2008. 199 с.
4. Каталог горных ударов на рудных и нерудных месторождениях (Североуральское, Таштагольское, Октябрьское (Норильск), Юкспорское, Кукисвумчорское (ПО «Апатит»), Кочкарское и другие месторождения. Л.: ВНИМИ, 1989. 182 с.

5. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97). М.: ИФЗ РАН, 1999.
6. Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. В 3-х т. / Под ред. Н.П. Лаврова и Д.В. Рундквиста. М: ИГЕМ РАН, 2006.
7. Курленя М.В., Серяков В.М., Еременко А.А. Техногенные геомеханические поля напряжений. Новосибирск: Наука, 2005. 264 с.
8. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И. и др. Вращения и деформации Земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 7. С. 1006–1017.
9. Петров В.А., Лексин А.Б., Погорелов В.В., Ребецкий Ю.Л., Саньков В.А., Ашурков С.В., Рассказов И.Ю. Геодинамическое моделирование рудоносных геологических структур (на примере района Стрельцовского рудного поля) // Геология рудных месторождений. 2017. Том 59. № 3. С. 173–200.
10. 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.
11. Саньков В.А., Леви К.Г., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И. Современные движения литосферных блоков Центральной Азии по данным GPS-геодезии // Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии. Под ред. К.Г. Леви и С.И. Шермана. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С. 165–179.
12. Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии // Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений. М.: ИФЗ РАН, 2010. С. 15–43.
13. Фундаментальные основы формирования ресурсной базы стратегического сырья (Au, Ag, Pt, Cu, редкие элементы и металлы) // Отв. ред. Н.С. Бортников. М.: ГЕОС, 2012. 340 с.
14. Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 2: Геология урана, геоэкология, гляциология // Отв. ред. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2011. 431 с.
15. Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard, and Policy Issues // Stein S., Mazzotti S. (eds). Geological Society of America Special Paper 425. Doi: 10.1130/2007.2425(01).
16. Heidbach O., Rajabi M., Reiter K., Ziegler M. World Stress Map 2016. GFZ Data Services. doi:10.5880/WSM. 2016. 002.
17. Hickman S., Zoback M., Ellsworth W. Introduction to special section: Preparing for the San Andreas Fault Observatory at Depth // Geophysical Research Letters. 2004. No. 31. L12S01. Doi: 10.1029/2004GL020688.
18. Roeloffs E. The Parkfield, California earthquake experiment: An update in 2000 // Current Science. 2000. No. 79. Pp. 1226–1236.

## References

1. Adushkin V.V., Turuntaev S.B. (2005) *Tekhnogennyye protsessy v zemnoy kore* [Technogenic processes in the crust]. INEC. Moscow. P. 252.
2. Bortnikov N.S., Petrov V.A., Veselovsky A.V. et al. (2012) *Geoinformatsionnaya sistema (GIS) zabaykal'skogo sektora Mongolo-Okhotskogo podvizhnogo poyasa* [Geoinformation system (GIS) of the Transbaikalian sector of the Mongol-Okhotsk mobile belt] *Rudy i metally* [Ores and metals]. No. 3. Pp. 18–27.
3. *Geoinformatsionnaya sistema (GIS) zabaykal'skogo sektora Mongolo-Okhotskogo podvizhnogo poyasa. Pod red. D.F. Akherna, N.P. Laverova* [Internationalization of the nuclear fuel cycle: goals, strategies and problems (2008) Ed. D.F. Ahern and N.P. Laverov]. «Rudy i metally». Washington, DC. The National Academies Press, USA. P. 199.
4. *Katalog gornyykh udarov na rudnykh i nerudnykh mestorozhdeniyakh (Severoural'skoe, Tashtagol'skoe, Oktyabr'skoe (Noril'sk), Yuksporskoe, Kukisvumchorskoe (PO «Apatit»), Kochkarskoe i drugie mestorozhdeniya* [Catalog of rock bursts on ore and non-ore deposits (Severouralsk, Tashtagol, Oktyabrsk (Norilsk), Yuksporsk, Kukisvumchorr (PO «Apatite»), Kochkarsk and other deposits] (1989) *VNIMI* [VNIMI]. Leningrad. P. 182.

5. *Komplekt kart obshchego seysmicheskogo rayonirovaniya territorii Rossiyskoy Federatsii (OSR-97)* [A set of maps of the general seismic zoning of the territory of the Russian Federation (OSR-97)] (1999) *IFZ RAN* [IFZ RAS]. Moscow.
6. *Krupnye i superkrupnye mestorozhdeniya rudnykh poleznykh iskopaemykh. V 3-kh t. Pod red. N.P. Laverova i D.V. Rundkvista* [Large and superlarge deposits of ore minerals. In 3 vol. (2006). Ed. N.P. Laverov, D.V. Rundqvist] *IGEM RAN* [IGEM RAS]. Moscow.
7. Kurlenya M.V., Seryakov V.M., Eremenko A.A. (2005) *Tekhnogennye geomekhanicheskie polya napryazheniy* [Technogenic geomechanical stress fields] *Nauka* [Science]. Novosibirsk. P. 264.
8. Lukhnev A.V., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I. et al. (2010) *Vrashcheniya i deformatsii Zemnoy poverkhnosti v Baykalo-Mongol'skom regione po dannym GPS-izmereniy* [Rotations and deformations of the Earth's surface in the Baikal-Mongolian region according to GPS measurements] *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics]. T. 51. No. 7. Pp. 1006–1017.
9. Petrov V.A., Leksin A.B., Pogorelov V.V., Rebetsky Yu.L., Sankov V.A., Ashurkov S.V., Rasskazov I.Yu. (2017) *Geodinamicheskoe modelirovanie rudonosnykh geologicheskikh struktur (na primere rayona Strel'tsovskogo rudnogo polya)* [Geodynamic modeling of ore-bearing geological structures (on example of the area Strel'tsovskiy ore field)] *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of ore deposits]. Vol. 59. No. 3. Pp. 173–200.
10. Petrov V.A., Veselovsky A.V., Kuzmina D.A. (2014) *Modelirovanie i monitoring geodinamicheskoy obstanovki s pomoshch'yu geoinformatsionnoy sistemy* [Modeling and monitoring of geodynamic conditions using a geographic information system] *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review]. No. 8. Pp. 133–138.
11. Sankov V.A., Levi K.G., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I. (2005) *Sovremennye dvizheniya litosfernykh blokov Tsentral'noy Azii po dannym GPS-geodezii* [Modern movements of lithospheric blocks of Central Asia according to GPS-geodesy. *Aktual'nye voprosy sovremennoy geodinamiki Tsentral'noy Azii. Pod red. K.G. Levi i S.I. Shermana* [Actual issues of modern geodynamics of Central Asia. Ed. K.G. Levi, S.I. Sherman] *Izd-vo SO RAN* [Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences]. Novosibirsk. Pp. 165–179.
12. Sobolev G.A. (2010) *Kontseptsiya predskazuemosti zemletryaseniy na osnove dinamiki seysmichnosti pri triggerenom vozdeystvii* [The concept of predictability of earthquakes based on the dynamics of seismicity under triggering effects] *Otsenka i puti snizheniya negativnykh posledstviy ekstremal'nykh prirodnykh yavleniy* [Evaluation and ways to reduce the negative effects of extreme natural phenomena] *IFZ RAN* [IFZ RAS]. Moscow. Pp. 15–43.
13. *Fundamental'nye osnovy formirovaniya resursnoy bazy strategicheskogo syr'ya (Au, Ag, Pt, Cu, redkie elementy i metally). Otv. red. N.S. Bortnikov* [Fundamentals of the formation of the resource base of strategic raw materials (Au, Ag, Pt, Cu, rare earth elements and metals) (2012). Editor-in-chief N.S. Bortnikov] *GEOS* [GEOS]. Moscow. P. 340.
14. *Ekstremal'nye prirodnye yavleniya i katastrofy. T. 2: Geologiya urana, geoekologiya, glyatsiologiya. Otv. red. A.O. Glyko* [Extreme natural phenomena and disasters. T. 2: Uranium geology, geoecology, glaciology. Ed. A.O. Glyko (2011)] *IFZ RAN* [IFZ RAS]. Moscow. 431 p.
15. Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard, and Policy Issues. Stein S., Mazzotti S. (Eds). Geological Society of America Special Paper 425. Doi: 10.1130/2007.2425(01).
16. Heidbach O., Rajabi M., Reiter K., Ziegler M. (2016) World Stress Map 2016. GFZ Data Services. Doi: 10.5880/WSM.002.
17. Hickman, S., Zoback, M., Ellsworth, W. (2004) Freedom Observatory at Depth, Geophysical Research Letters. No. 31. L12S01. Doi: 10.1029/2004GL020688.
18. Roeloffs E. (2000) The Parkfield, California earthquake experiment: An update in 2000. *Current Science*. No. 79. Pp. 1226–1236.