

На правах рукописи

Соловицкий Александр Николаевич



Разработка методологии моделирования напряженно-деформированного
состояния блоков земной коры для геодезического мониторинга районов
освоения угольных месторождений

1.6.22. Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный консультант – доктор технических наук, старший научный сотрудник Каленицкий Анатолий Иванович.

Официальные оппоненты:

Брынь Михаил Ярославович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», профессор кафедры инженерной геодезии;

Мустафин Мурат Газизович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», заведующий кафедрой инженерной геодезии;

Щербаков Владимир Васильевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой «Инженерная геодезия».

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (г. Москва).

Защита состоится 12 октября 2021 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/solovitskiy-aleksandr-nikolaevich/>

Автореферат разослан 2 июля 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.97.

Подписано в печать 21.06.2021. Формат 60×80 1/16.

Печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ 73.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ.

630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ.

630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Современной тенденцией передовых геодезических технологий является дальнейшее повышение точности, оперативности, автоматизации процессов измерений и разработка новых способов сбора, хранения и обработки полученной информации на новой методологической и технологической информационной основе. Поэтому их востребованность для изучения природных и техногенных геодинамических процессов при освоении угольных месторождений соответствует приоритетному направлению развития науки и техники РФ – «возрастание антропогенных нагрузок на окружающую среду до масштабов, угрожающих воспроизводству природных ресурсов, и связанный с их неэффективным использованием рост рисков для жизни и здоровья граждан» и имеет важное научное и практическое значение.

Информация о техногенных угрозах является важнейшей в аспекте прогноза катастрофических геодинамических явлений (ГДЯ) при освоении угольных месторождений: горных ударов, внезапных выбросов, землетрясений. При этом страдают не только горнопромышленные предприятия, но и люди. Так, например, в крупнейшем угольном регионе в Кузбассе число смертельных случаев оценивается зависимостью: один человек на 12 млн тонн добычи угля, а ежегодный материальный ущерб – более 500 млн рублей. Однако, несмотря на материальные и людские потери, комплексная система геодезического мониторинга природных и техногенных геодинамических процессов при освоении угольных месторождений до настоящего времени все еще не разработана. В то же время эпизодически выполняемые повторные геодезические наблюдения на техногенных геодинамических полигонах, обеспечивающие основной объем информации о состоянии природных и техногенных геодинамических процессов угольных бассейнов, неоднозначны, трудоемки, недостаточно детальны и оперативны.

Традиционные технологии геодезическо-маркшейдерского мониторинга на подработанных территориях в районах освоения угольных месторождений

в настоящее время ориентированы главным образом на изучение кинематики и деформаций поверхности земной коры при доминирующей роли геотехнического мониторинга, а используемые модели геодезического мониторинга не обеспечивают как адресность информации, так и адекватность структурам земной коры. В то же время более успешный опыт мониторинговых систем на месторождениях углеводородов, атомных и гидроэлектростанциях в полной мере на угольных месторождениях не используется.

В условиях сложившейся проблемной ситуации в районах освоения угольных месторождений между передовыми технологическими возможностями геодезической науки и недостаточностью полноценных теоретических разработок и моделей в области получения, сбора, регистрации, обработки и анализа информации об изменении состояния земной коры, а также чрезвычайно большого разнородного её объёма в рассматриваемой предметной области, который слабо систематизирован и обобщён, мало изучен и утрачивается в условиях имеющего место снижения преемственности знаний между поколениями, – настоятельно требуется разработка новых теоретических и информационных принципов формирования нового методологического подхода для комплексного мониторинга природных и техногенных геодинамических процессов в условиях освоения угольных месторождений.

Поэтому разработка методологии моделирования напряженно-деформированного состояния блоков земной коры для геодезического мониторинга районов освоения угольных месторождений в целях обеспечения безопасности их освоения является *решением научной проблемы*, имеющей важное социально-экономическое значение в области геодинамической безопасности при освоении недр, снижения риска и уменьшения последствий геодинамических катастроф природного и техногенного характера.

В традиционных системах геодезического мониторинга моделирование чаще используется для анализа результатов. Поскольку параметры напряженно-

деформированного состояния (НДС) земной коры путем непосредственных измерений геодезическими методами недоступны, то моделирование необходимо использовать во всех составляющих геодезического мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры (ГМНДСЗК): регистрации, оценке и прогнозе информации. Поэтому для решения вышеуказанной научной проблемы соискателем предлагается разработка динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений, базирующейся на новых теоретических и информационных принципах, которые формируют новый методологический подход. Новые теоретические принципы включают теоретические основы и моделирование строения, кинематики, напряженно-деформированного состояния и его прогноза, иерархии земной коры угольных месторождений. Новый методологический подход заключается в реализации динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений и базирующийся на новых пяти теоретических и информационных принципах, которые определяются автором как целевой, функциональный, структурно-организационный, пространственный и временной и формируют новый методологический подход. Разработка теоретических принципов и обоснование нового методологического подхода связано с введением новых понятий: «динамические параметры блока земной коры» и «пространственная структурная модель ячейки геодезических построений ГДП блока земной коры», расширяющих современный понятийный аппарат геодезии.

Изложенное выше позволяет считать разработку методологии моделирования напряженно-деформированного состояния блоков земной коры для геодезического мониторинга районов освоения угольных месторождений на основе реализации его динамической модели, базирующейся на новых теоретических и информационных принципах, актуальной и своевременной. Важнейшим практическим значением разработанных автором новых теоретических и информационных принципов является не только гибкость и экономическая эффективность реализации ГМНДСЗК, но и решение народно-хозяйственных задач, нацеленных

на повышение уровня геодинамической безопасности при освоении недр, снижение риска и уменьшение последствий геодинамических катастроф природного и техногенного характера.

Степень разработанности темы исследований. Весомый вклад в развитие исследований по изучению природных и техногенных геодинамических процессов при освоении месторождений путем создания мониторинговых систем внесен научными сотрудниками Центрального научно-исследовательского института геодезии, аэрофотосъемки и картографии; Научно-исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела; Института физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской Академии Наук (РАН); Института нефтегазовой геологии и геофизики имени А. А. Трофимука Сибирского отделения РАН; Московского государственного университета геодезии и картографии; Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева; институтов горного дела Сибирского и Уральского отделений РАН; Горного института Кольского научного центра РАН; Московского государственного горного университета; Пермского государственного научно-исследовательского университета, Сибирского государственного университета геосистем и технологий. Решение проблемы контроля напряженно-деформированного состояния земной коры в районах освоения месторождений для обеспечения безопасности их освоения основано на результатах исследований многих отечественных и зарубежных ученых, имеющих фундаментальный характер исследований, среди них: Баранов В. Н., Батугина И. М., Батугин А. С., Бузук В. В., Бровар Б. В., Бровар В. В., Брынь М. Я., Герасименко М. Д., Гольдин С. В., Гуляев Ю. П., Егоров П. В., Есиков Н. П., Еремеев В. Ф., Журавков М. Н., Каленицкий А. И., Касахара К., Кафтан В. И., Кашников Ю. А., Константинова С. А., Козырев А. А., Колмогоров В. Г., Кузьмин Ю. О., Курленя М. В., Леонтьев А. В., Лисицкий Д. В., Лобанова Т. В., Магницкий В. А., Мазуров Б. Т., Макаров А. Б., Мещеряков Ю. А., Маркузе Ю. И., Машимов М. М., Мустафин М. Т., Опарин В. Н., Панкрушин В. К., Певнев А. К., Пелленен Л. П., Проворов К. Л., Петухов И. М., Сагитов М. У., Садовский М. А., Сашурин А. Д.,

Серебрякова Л. И., Сидоров В. А., Стеблов Г. М., Сурков В. С., Тимофеев В. Ю., Теркот Д., Уставич Г. А., Франк Ф. С., Хасимото Макабу, Хачай О. А., Шайдеггер А., Шуберт Дж., Щербаков В. В., Юркина М. И., Ямбаев Х. К. и др. Однако, несмотря на вклад этих ученых, вышеуказанная проблемная ситуация полностью не решена из-за неоднозначности кинематических характеристик амплитуд движений, отсутствия типовых систем сбора, обработки и представления разнородной информации на ГДП, плоских моделей блоков земной коры, отдельного изучения вертикальных и горизонтальных движений и т. п.

Цели и задачи исследований. Целью исследований является разработка методологии моделирования напряженно-деформированного состояния блоков земной коры для геодезического мониторинга районов освоения угольных месторождений, базирующейся на новых теоретических и информационных принципах и формирующей новый методологический подход.

Основные задачи исследований:

1 Выполнить анализ проблемной ситуации, заключающийся в существовании объективного противоречия между передовыми технологическими возможностями геодезической науки и недостаточностью полноценных теоретических разработок и моделей в области сбора, регистрации, обработки и анализа изменения состояния земной коры в районах освоения угольных месторождений.

2 Обосновать содержание и ввести в научный оборот понятия: «динамические параметры блока земной коры» и «пространственная структурная модель ячейки геодезических построений ГДП блока земной коры».

3 Теоретически обосновать новый методологический подход, базирующийся на новых теоретических и информационных принципах, для реализации динамической модели ГМНДСЗК с целью формирования полноценной системы сбора информации о напряженно-деформированном состоянии блоков земной коры разных рангов.

4 Разработать теоретические основы контроля напряженно-деформированного состояния блоков земной коры для формирования прогнозных оценок его

развития с последующей выработкой профилактических мер и рекомендаций для реализации динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений (*целевой принцип*).

5 Теоретически обосновать взаимосвязанность и взаимообусловленность системы постоянных наблюдений, оценки, прогноза и контроля для реализации динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений (*функциональный принцип*).

6 Теоретически обосновать основные положения взаимодействия динамической модели ГМНДСЗК с другими системами и её подсистемами (*структурно-организационный принцип*).

7 Разработать теоретическое обоснование пространственной структурной модели ячейки построений геодинамического полигона (ГДП) блока земной коры как основы многоуровневых геодезических построений и получения информации для создания динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений (*пространственный принцип*).

8 Разработать теоретическое обоснование частоты наблюдений и сбора информации во времени для реализации динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений (*временной принцип*).

9 Теоретически обосновать применимость разработанной динамической модели ГМНДСЗК для решения фундаментальной и прикладных задач геодинамики месторождения.

Объект и предмет исследований. Объектом исследования является напряженно-деформированное состояние земной коры, а предметом – методология его моделирования для геодезического мониторинга районов освоения угольных месторождений.

Научная новизна состоит в следующем.

1 Новые теоретические и информационные принципы формируют новый методологический подход для разработки динамической модели ГМНДСЗК,

включающей системы контроля изменения напряженно-деформированного состояния блоков земной коры, постоянных наблюдений, оценки, прогноза и контроля их кинематики и динамических параметров, что в отличие от предложенных ранее моделей позволяет обеспечить более надежное и адресное определение состояния структур земной коры.

2 Разработанная на новых теоретических и информационных принципах динамическая модель ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений формирует полноценную систему сбора информации о напряженно-деформированном состоянии блоков земной коры разных рангов, её оценки, прогноза и контроля и позволяет внедрить на угледобывающих предприятиях новый подход к исследованию их геодинамики.

3 Теоретически обоснован новый методологический подход, базирующийся на новых теоретических и информационных принципах для реализации динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений, характеризующийся поэтапностью, типовой структурой и экономической эффективностью и позволяющий обеспечить решение задач геодинамической безопасности.

4 Разработан научно-обоснованный прогноз состояния блоков земной коры, базирующийся на унифицированном подходе проведения прикладных геодинамических исследований и решении фундаментальной задачи геодинамики месторождения, позволяющий обеспечить управление их развитием.

5 Предложены понятия: «динамические параметры блока земной коры» и «пространственная структурная модель ячейки геодезических построений ГДП блока земной коры», расширяющие современный понятийный аппарат геодезии при формализации решения фундаментальной задачи геодинамики месторождения.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в том, что предложенные новые теоретические и информационные принципы, формирующие новый методологический подход,

создали теоретические предпосылки для разработки динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений. А разработанные теоретические основы полноценной системы сбора информации о напряженно-деформированном состоянии блоков земной коры разных рангов, её оценки, прогноза и контроля позволяют реализовать новый методологический подход в процессе ее разработки. Предложенные новые понятия могут быть использованы специалистами как в области геодезии, так и смежных наук о Земле. Это увеличивает возможности специалистов при анализе многоуровневой и разнородной информации ГМНДСЗК, а также включают в оборот геодезии новейшие достижения смежных наук о Земле.

Практическая значимость реализации нового методологического подхода при разработке динамической модели ГМНДСЗК состоит в обеспечении гибкой и экономически эффективной системы геодезического мониторинга в процессе решения задач геодинамической безопасности. Результаты исследований предполагается использовать на угледобывающих предприятиях, в образовательных учреждениях и организациях, связанных с изучением геодинамики месторождений.

Методология и методы исследований основывались на теоретических обобщениях и заключениях, методологии системного подхода, теории построения и математической обработки геодезических сетей и теории упругости, статистических методах обработки данных. Определение динамических параметров блоков земной коры выполнялось по авторским программам в среде программирования *QBASIC*. При этом использовались методы статистического анализа и наименьших квадратов. Для проверки теоретических положений, алгоритмов, программного обеспечения использовались как результаты модельных построений и расчетов, так и фактические результаты натурных наблюдений на территории шахт, разрезов и ГДП. На поисковом этапе исследований привлекались материалы и фактические данные натурных геодезических и гравиметрических наблюдений на Саяно-Шушенском, Междуреченском, Токтогульском,

Североуральском геодинамических полигонах, в которых автор диссертации принимал личное участие.

Положения, выносимые на защиту:

1 Теоретически обоснованный новый методологический подход, базирующийся на новых теоретических и информационных принципах при реализации динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений позволяет обеспечить решение фундаментальной и прикладных задач для оценки возможного риска проявления ГДЯ и повышения уровня геодинамической безопасности при их освоении.

2 Реализованная на новых теоретических и информационных принципах динамическая модель ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений обеспечивает получение полноценной информации об объемной деформации земной коры, повышает её адекватность структурам земной коры и достоверность регистрации проявлений геодинамических процессов.

3 Предложенные определения понятий: «динамические параметры блока земной коры» и «пространственная структурная модель ячейки геодезических построений ГДП блока земной коры» – обеспечивают формулирование и решение задач изучения геодинамики месторождения.

4 Разработанный научно-обоснованный прогноз состояния блоков земной коры обеспечивает целенаправленность и фундаментальность изучения развития их деформаций с учетом степени опасности формирования очага ГДЯ и унифицированности использования геодезической информации.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационное исследование по содержанию и характеру полученных результатов соответствует следующим областям исследования: 2 – Создание геодезической координатно-временной основы различного назначения с использованием геодезических, астрономических, гравиметрических и других (космических, наземных и подземных) методов измерений; оценка их степени устойчивости и характера изменений,

вопросы их проектирования и оптимизации. Геодезические системы координат; 8 – Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры и ее поверхности, зданий и сооружений, вызванного природными и техногенными факторами, с целью контроля их устойчивости, снижения риска и последствий природных и техногенных катастроф, в том числе землетрясений; 11 – Теория и практика математической обработки результатов геодезических измерений и информационное обеспечение геодезических работ. Автоматизированные технологии создания цифровых трехмерных моделей технологических объектов, процессов и явлений по геодезическим данным паспорта научной специальности 25.00.32 – Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечена применением известных методов моделирования, механики сплошной среды, удовлетворительной сходимостью результатов аналитических и экспериментальных исследований, многочисленными и длительными комплексными измерениями в натурных условиях кинематических параметров блочного массива горных пород на месторождениях, положительными результатами проверки основных положений диссертационной работы на материалах повторных наблюдений на ГДП.

Основные положения диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях Кузбасского государственного технического университета (Кемерово, 1986–2010 гг.), I, IV, VIII, IX Российско-Китайском симпозиуме «Строительство шахт и городских подземных сооружений» (Кемерово-Тайвань, 2000, 2006, 2016, 2018 гг.), IV, V, VII, X Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах» (Кемерово, 2000, 2002, 2007, 2013 гг.), IX, X, XI, XII Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (Кемерово, 2001, 2004, 2006, 2008, 2012 гг.), научно-технических конференциях Московского государственного горного университета «Неделя горняка–2004, 2007, 2009» (Москва, 2004, 2007, 2009 гг.), VI, VII, VIII, XI Международных научных конгрессах «Интерэкспо ГеоСибирь–2010, 2011,

2012, 2015, 2018, 2019» (Новосибирск, 2010, 2011, 2012, 2015, 2018 гг.), II и III Международном инновационном горном симпозиуме (Кемерово, 2017, 2018 гг.).

Результаты исследований используются в учебном процессе в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кемеровский государственный университет» и в Шаньдунском Научно-техническом университете. Разработанная автором программа «ВМ» нашла применение при изучении НДС блоков земной коры в Шерегешском рудоуправлении и на шахтах «Чертинская» и «Костромовская».

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в 28 научных публикациях, из них 11 – в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук, 3 – свидетельства о регистрации программ для электронных вычислительных машин и 3 статьи – в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus.

Структура диссертации. Диссертация состоит: из введения, 4 разделов, заключения, библиографического списка, списка принятых сокращений. Общий объем диссертации 266 страниц, включая 69 таблиц и 72 рисунка. Библиографический список включает 267 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во *Введении* отражена актуальность темы исследований, показана степень разработанности проблемы, обоснованы цели и задачи, объект и предмет исследований, научная и практическая значимость, приведены основные результаты реализации поставленных в диссертационной работе задач, а также научные положения, выносимые на защиту.

Первый раздел «Аналитический обзор состояния мониторинга кинематики и деформации поверхности земной коры при освоении угольных месторождений»

посвящен анализу изучения кинематики поверхности земной коры в районах освоения месторождений традиционными методами. Нормативными документами при проведении прикладных геодинимических исследований в районах освоения месторождений полезных ископаемых рекомендуется следующая технология их реализации. Мобильные пункты закладываются на двух взаимно перпендикулярных профилях с интервалом через 2 км, а стабильные – на противоположных сторонах этих профилей вне зоны ведения горных работ. Результатами повторных геодезических наблюдений на таких ГДП чаще всего являются амплитуды и скорости движений поверхности земной коры, которые часто представляются в виде таблиц, графиков, векторных схем, карт и т. п. Реже результатами представления являются компоненты деформации поверхности земной коры (сдвига и дилатации), рассчитываемые для плоской фигуры – треугольника. Выполненные автором экспериментальные исследования показали неоднозначность подобного подхода (расхождения количественно оцениваются в пять и более раз) и выявили зависимость полученных деформаций земной коры от ориентации их элементарной ячейки (треугольника в вертикальной или горизонтальной плоскостях) и от ее формы. Кроме этого, автором проанализированы традиционная методика инструментальных наблюдений движений земной поверхности на границах блоков земной коры, а также камеральная обработка их новейших движений в районах освоения месторождений. Следует заметить, что теоретические основы исследований техногенных движений земной поверхности на подработанных территориях при маркшейдерском (геотехническом) мониторинге базируются на тех же принципах. А новые возможности геодезических технологий, заключающиеся в повышении точности и оперативности наблюдений, не могут однозначно разрешить проблемную ситуацию. Разработанные автором новые теоретические положения для реализации ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений, базирующиеся на новых теоретических и информационных принципах и новом методологическом подходе, позволяют корректно и качественно разрешить существующую проблемную ситуацию.

Во втором разделе «Теоретические и информационные принципы формирования нового методологического подхода реализации динамической модели ГМНДСЗК» предложены новые принципы для формирования методологического подхода к реализации указанной модели. Динамическая модель ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений рассматривается на примере Кузбасса, является иерархической и многоуровневой системой, по мнению соискателя, отражает изменение состояния блоков земной коры в год и базируется на следующих новых пяти принципах.

Целевой принцип – теоретические основы контроля изменения напряженно-деформированного состояния блоков земной коры – обеспечивают обоснование прогнозных оценок их развития с последующей выработкой профилактических мер и рекомендаций. Целевой принцип построения системы мониторинга с учетом достижения конечной цели – контроля НДС блоков земной коры. Теоретическое обоснование целевого принципа заключается в следующем: сам процесс наблюдения не является непосредственной целью, регистрация кинематики блоков земной коры, последующий их анализ и оценка – это лишь средство достижения цели указанной модели (рисунок 1).

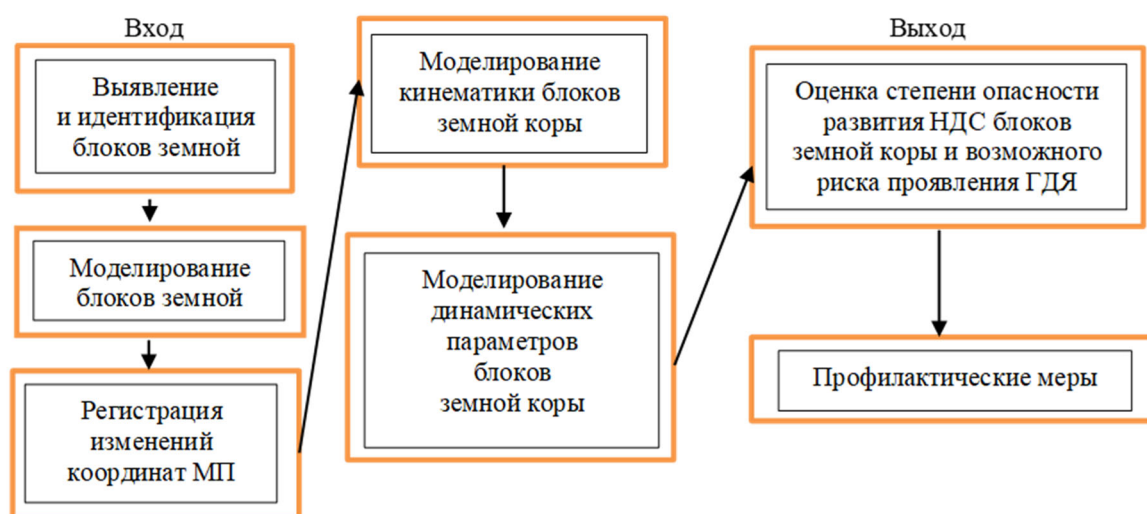


Рисунок 1 – Схема достижения цели динамической модели ГМНДСЗК

Поэтому целевой принцип включает разработку профилактических мер и решение задач геодинамики месторождений. Разработка профилактических мер основывается на методе функционального зонирования, в рамках которого устанавливается степень опасности его развития и возможный риск проявления ГДЯ. Кроме профилактических мер целевой принцип реализации динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений нацелен на решение фундаментальной и прикладных задач геодинамики месторождения. Прикладные задачи включают: определение типа геодинамической ситуации, контроль изменения во времени главных направлений деформаций, ранжирование изменений во времени деформаций и контроль накопления потенциальной энергии деформирования блоков земной коры. Фундаментальная задача геодинамики месторождения заключается в исследовании закономерностей перераспределения потенциальной энергии деформирования в блоках земной коры разных рангов и формирования в них очага ГДЯ, теоретическим обоснованием которого является IV степень опасности развития деформаций блока земной коры и накопление плотности энергии не менее $12 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{м}^3$.

Функциональный принцип – теоретическое обоснование взаимосвязанности и взаимообусловленности системы постоянных наблюдений, оценки и прогноза динамической модели ГМНДСЗК – представляет собой целенаправленную деятельность, состоящую из упорядоченного набора процедур, организованных в циклы. Функциональный принцип следует из определения ГМНДСЗК – как комплексной триединой системы геодезического контроля состояния земной коры, предусматривающей регистрацию ее кинематики с учетом строения и иерархии, определение динамических параметров и оценку степени опасности развития деформаций и возможного риска проявления ГДЯ (см. рисунок 1). Теоретическим обоснованием указанного принципа является связь кинематики блоков земной коры с параметрами проявления ГДЯ посредством определения их динамических параметров $\text{ДП}(e_{ij}(t-t_0), \sigma_{ij}(t-t_0), E(t-t_0))$

$$\text{ДП}(e_{ij}(t-t_0), \sigma_{ij}(t-t_0), E(t-t_0)) = F(\Delta X_{km}(t-t_0), \Delta Y_{km}(t-t_0), \Delta H_{km}(t-t_0)), \quad (1)$$

где $\Delta X_{km}(t-t_0), \Delta Y_{km}(t-t_0), \Delta H_{km}(t-t_0)$ – количественные характеристики кинематики блока земной коры k .

«Динамические параметры блока земной коры» – это новое понятие, предложенное соискателем. Теоретическое обоснование динамических параметров заключается в следующем. Кинематические характеристики блоков земной коры разных рангов относительно и неоднозначны в отношении одинаковых значений их изменений во времени деформаций и поэтому не могут быть приняты в качестве их динамических параметров. Более приемлемым их вариантом являются изменения во времени деформаций блоков земной коры, которые носят интегральный характер. Таким образом, динамическими параметрами принято считать изменения во времени деформаций (напряжений) и потенциальной энергии, обуславливающие кинематику блока земной коры. Основой их определения является связь перемещений с компонентами тензора деформаций, описываемая с помощью следующего уравнения в матричной форме:

$$R[t_0]D[t-t_0] = -\Delta R[t-t_0], \quad (2)$$

где $D[t-t_0]$ – компоненты тензора 2-го ранга $[e_{ij}[t-t_0]]$;

$R[t_0]$ – координаты пунктов $(X[t_0], Y[t_0], H[t_0])$;

$\Delta R[t-t_0]$ – изменение координат во времени за период $t-t_0$.

Предложенные соискателем динамические параметры блока земной коры играют ключевую роль в указанном цикле, так как являются основой для анализа, прогноза и контроля (рисунок 2).

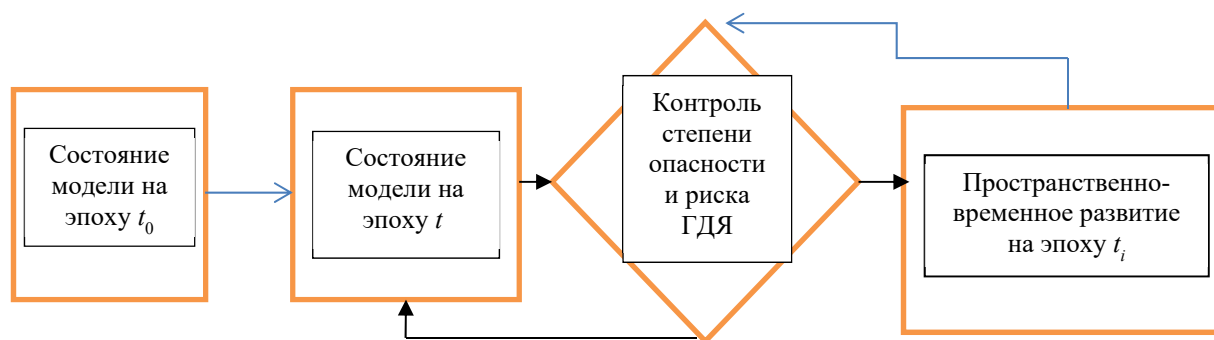


Рисунок 2 – Схема цикличности динамической модели ГМНДСЗК

Цикличность обеспечивает итерационный подход повышения точности и надежности результатов наблюдений, последовательных прогнозов и прогнозных рекомендаций, а последовательные профилактические меры со временем становятся все более оптимальными. Таким образом, функциональный принцип определяет сложно построенную, циклически работающую на итерационном подходе и развивающую во времени постоянно действующую динамическую модель ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений Кузбасса.

Структурно-организационный принцип – теоретические основы положений взаимодействия между подсистемами динамической модели ГМНДСЗК – определяются структурой и иерархией земной коры. Его теоретической основой является структура и иерархия земной коры. Соискателем принята блочная структура земной коры и предложена следующая классификация ее иерархии, соответствующая строению земной коры: детальный уровень (месторождение (шахта)) – блоки земной коры VI и V рангов; локальный уровень (геолого-экономический (административный) район) – блоки земной коры IV и III ранга, региональный уровень (Кузбасс) – блоки земной коры II ранга. Теоретическим обоснованием детального уровня подсистемы являются результаты моделирования связи изменения во времени потенциальной энергии и ее плотности, и ранга блоков земной коры, выполненные соискателем (рисунок 3).

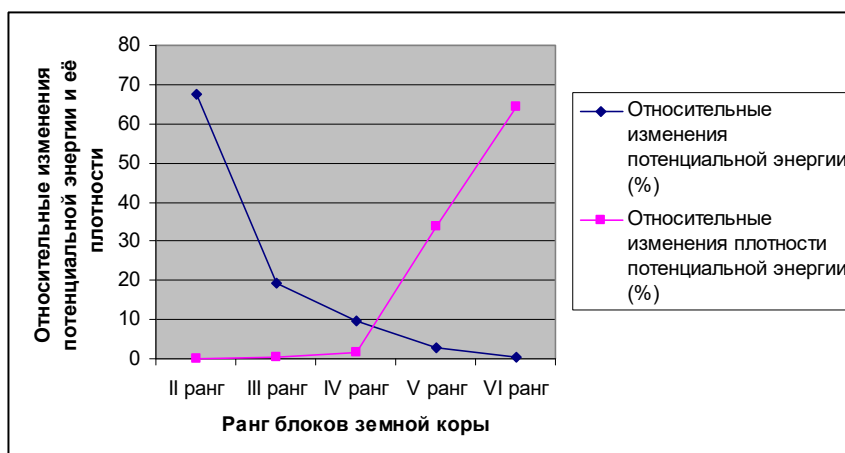


Рисунок 3 – Зависимость изменения во времени потенциальной энергии и её плотности от ранга блоков земной коры

Результаты моделирования, приведенные на рисунке 3, свидетельствуют о том, что изменения во времени потенциальной энергии деформирования блоков земной коры Кузбасса находятся в обратной зависимости от их ранга (67 % в блоке II ранга и 1 % в блоке VI ранга), а соответствующие изменения ее плотности (64 % в блоке VI ранга и 0,5 % в блоках II и III ранга) – в прямой. Согласно полученным результатам, наиболее востребованными будут построения из двух уровней: блоков земной коры V и VI рангов.

Выделение блоков земной коры проводится на основе морфоструктурного анализа, а идентификация на местности – визуальным или инструментальным методом. Для однозначности выделения блоков земной коры и обеспечения указанного взаимодействия систем и подсистем соискателем предложен следующий классификатор, который включает код региона, год и метод его проведения (геологический – 01; геофизический – 02; геоморфологический – 03; картографический – 04; дистанционного зондирования – 05; комплексный – 06), ранг блока; иерархический номер. Код региона соответствует политико-административному делению Российской Федерации и определяет ее субъект. Ранг блока определяется принятой иерархией строения земной коры; так, при геодинамическом районировании Кузбасса применена шестиранговая система, поэтому иерархический номер будет 12-значным числом, например, 42:1987:04: 03: 000001000000.

Пространственный принцип – теоретическое обоснование пространственной структурной модели ячейки построений ГДП – основывается на ее адресности и адекватности блоку земной коры, а его взаимодействие с соседними блоками земной коры разных рангов определяет многоуровненность геодезических построений как основы получения информации для создания динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений. Пространственный принцип определяет пространственную систему пунктов получения информации и базируется на типовой пространственной ячейке геодезических построений ГДП блока земной коры, мобильные пункты (МП) которой имеют

определенную схему как расположения, так и закрепления (рисунки 4, 5), отражающую как его конфигурацию, так и глубину проникновения ограничивающих разломов. «Пространственная структурная модель ячейки геодезических построений ГДП блока земной коры» – это новое понятие, предложенное соискателем.

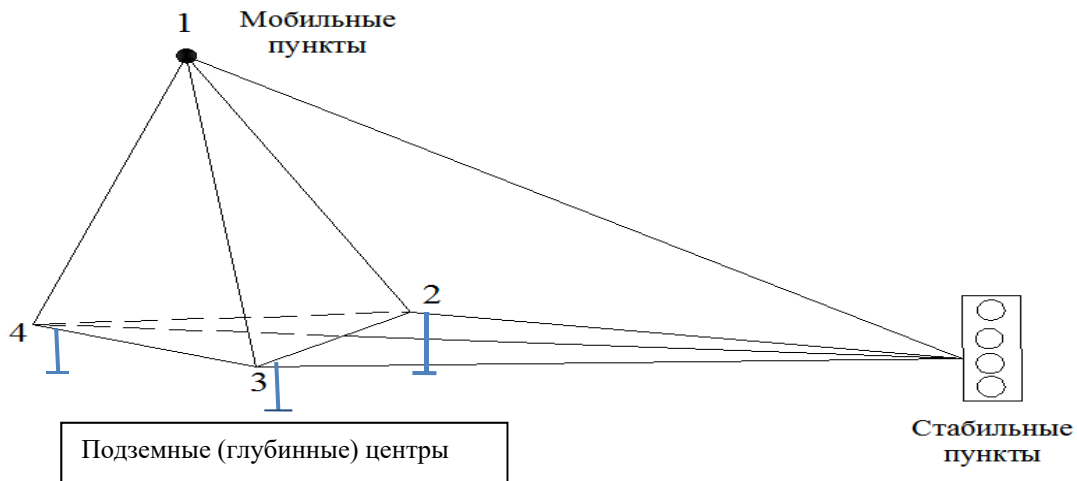


Рисунок 4 – Схема элементарной ячейки геодезических построений ГДП

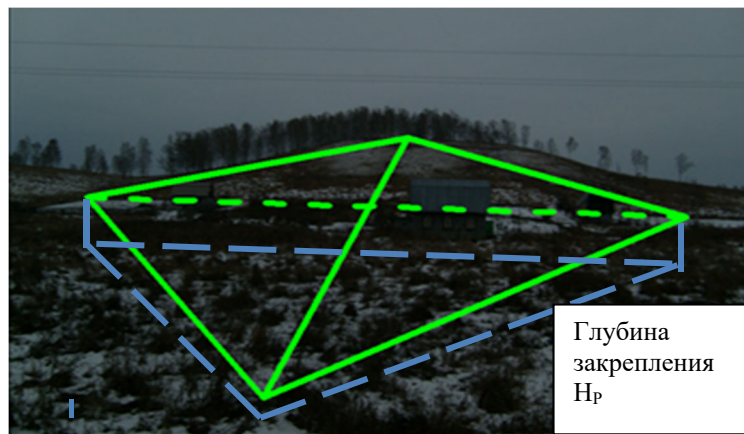


Рисунок 5 – Общий вид пространственной структурной модели ячейки построений ГДП блока земной коры на местности, состоящей из мобильных пунктов

Теоретическим обоснованием пространственной системы пунктов динамической модели ГМНДСЗК служит предложение соискателя о формировании

полноценной системы сбора информации о напряженно-деформированном состоянии структуры земной коры путем обеспечения адекватности указанных ячеек реальным блокам земной коры разных рангов, являющихся трехмерными геологическими телами и типизации геодезических построений ГДП в районах освоения угольных месторождений.

Временной принцип – теоретическое обоснование актуализации регистрируемой информации – определяется частотой наблюдений и сбора информации во времени. Временной принцип отражает своевременность актуализации регистрируемой информации, определяемой частотой опроса T проведения повторных наблюдений, которая получена соискателем:

$$T \geq 3mD[t - t_0] / Ve_{ij}[t - t_0], \quad (3)$$

где $Ve_{ij}[t - t_0]$ – скорость деформации исследуемого блока земной коры в год;

$$mD[t - t_0] = (m^2 D[t] + m^2 [t_0])^{0,5};$$

$mD[t], mD[t_0]$ – средние квадратические погрешности определения компонентов изменения во времени деформации $\Delta D[t - t_0]$ в эпохи t и t_0 .

В третьем разделе «Разработка динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений на основе новых теоретических и информационных принципов» реализован новый методологический подход при разработке динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений как сложной иерархической системы, включающий разработку теоретических положений для реализации ее основных модулей (модули 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2, 4.1, 4.2, 5.1) на предложенных соискателем новых принципах (целевом, функциональном, организационно-структурном, пространственном и временном) и формирующих методологический подход (рисунок 6).

Разработка теоретических положений формирования структурной пространственной модели ячейки построений ГДП как типовой основы многоуровневых геодезических построений и получения информации для динамической

модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений (подсистема 4) включает: управление погрешностями выделения блоков земной коры с учетом релаксации геодинамических процессов (модуль 4.1) и моделирование формы, конфигурации и ранга блоков земной коры выделения блоков земной коры (модуль 4.2).

Управление погрешностями выделения блоков земной коры с учетом релаксации геодинамических процессов необходимо выполнять для проектирования ГДП в рамках разработанного автором соответствующего геоинформационного обеспечения (ГИО). Одним из основных факторов указанного управления является точность, которая не может быть решена без анализа информации о рельефе.

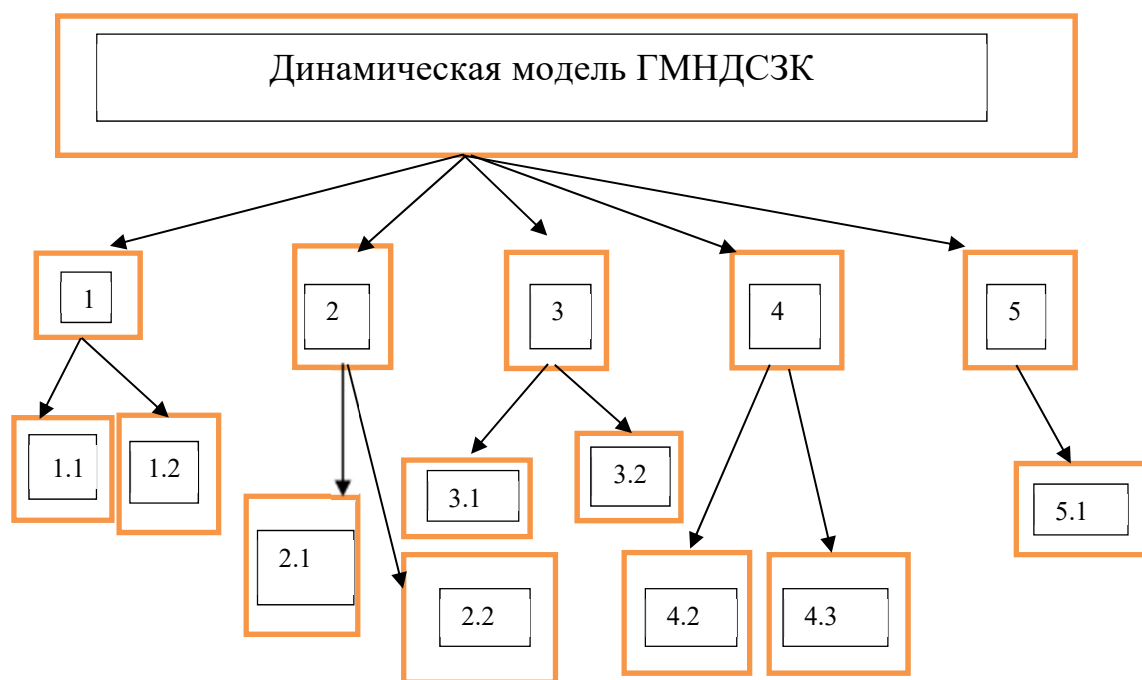


Рисунок 6 – Общая схема динамической модели ГМНДСЗК, построенная на новых принципах (подсистемы 1 – 5) и их реализация (модули: 1.1 –профилактических мер; 1.2 – задач геодинамики месторождения; 2.1 – цикличности; 2.2 – итерационного подхода; 3.1 – структуры; 3.2 – иерархии; 4.1– управление погрешностями выделения блоков земной коры; 4.2 – моделирования формы, конфигурации и ранга блоков земной коры; 5.1 – актуализации регистрируемой информации)

Без информации о рельефе местности, полученной с помощью наземных и дистанционных методов, включая БПЛА-технологии, не могут быть проведены выделение и идентификация блоков земной коры, что является основой проектирования ГДП. Известно, что современный рельеф сформировался в новейшее время, поэтому в качестве теоретического обоснования указанного моделирования соискателем принята гипотеза о действии и релаксации напряжений. Известно, что период релаксации напряжений для земной коры в целом составляет 10^5 – 10^6 лет. Следовательно, потребуется метод для изучения характера геодинамических процессов новейшего периода, происходивших в районе разработки месторождения не менее одного миллиона лет назад, и таким методом является морфоструктурный анализ на основе цифровой картографической информации. Автором предлагается следующий подход. Зная средние скорости вертикальных движений ($V = 0,1$ мм/год), оцениваем период T , за который изменения высот, обусловленные геодинамическими процессами, не превышают погрешности m_n определения отметок. Указанная связь представлена в следующем виде:

$$T = m_n / V. \quad (4)$$

Для гравиметрических карт погрешности информации оцениваются по полным погрешностям интерполирования $m_{\Delta g}$. Период времени T , за который изменения силы тяжести, обусловленные геодинамическими процессами, не превышают $m_{\Delta g}$, равен

$$T = m_{\Delta g} / 0,3086 V. \quad (5)$$

На рисунке 7 представлены периоды времени релаксации геодинамических процессов, которые соответствуют погрешностям цифровых топографических и гравиметрических карт. Результаты, приведенные на рисунке 7, показывают, что информация о геодинамических процессах, отраженная в масштабном ряде карт, позволяет оценить значительные периоды времени, ранжируя их по возрасту.

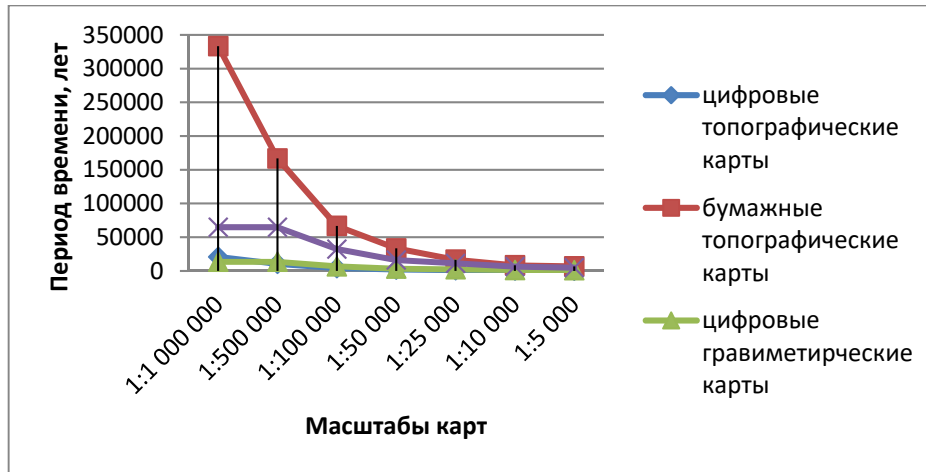


Рисунок 7 – Периоды времени релаксации геодинамических процессов, соответствующие погрешностям карт

Опыт применения пространственных фигур в геодезических построениях очень мало освещен в технической литературе, особенно при создании техногенных ГДП. Теоретические основы моделирования формы, конфигурации и ранга блоков земной коры по предложению соискателя базируются на типовой пространственной ячейке геодезических построений ГДП, мобильные пункты которой имеют определенную схему как расположения, так и закрепления (см. рисунки 4, 5). При этом мобильный пункт МП 1 соискателем предлагается располагать в вершине блока земной коры, а 2, 3 и 4-й – в узлах пересечения разломов (см. рисунок 5). Аппроксимацию трехмерного блока земной коры обеспечивает не только разный уровень указанных выше пунктов, но и глубина h_z их закрепления, которая должна быть соизмерима с глубиной проникновения разломов H_p . Предложенная структурная пространственная модель ячейки построений ГДП имеет значительное количество избыточных измерений, что характеризует ее жесткость и надежность определения изменений координат, а также обеспечивает определение параметров объемной деформации, отнесенных к центру тяжести этой фигуры. Такая модель ячейки имеет следующие геометрические ограничения: длина стороны основания S_o должна быть меньше расстояния между узлами разломов L_p , а глубина закрепления пунктов h_z соизмерима с H_p глубиной проникновения разломов. Оценка глубины заложения мобильных пунктов ГДП

для блока земной коры VI ранга выполнена автором на основе установленной им связи исследуемой глубины от вероятности изменения деформаций по программе «ВМ» (рисунок 8).

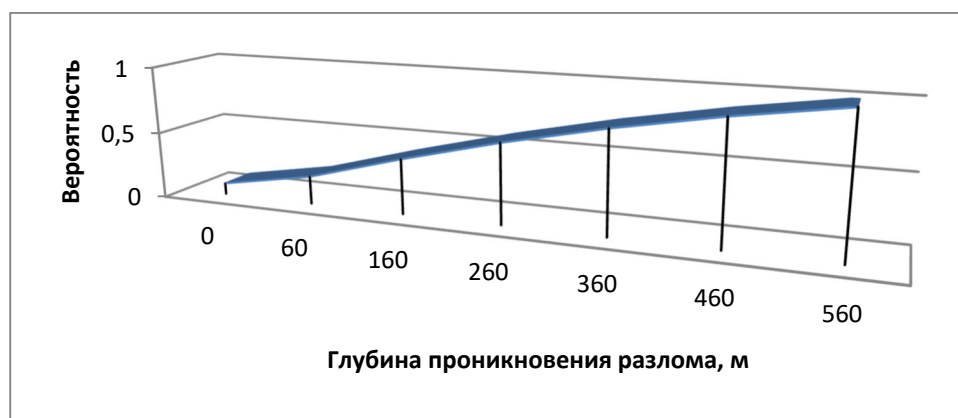


Рисунок 8 – Зависимость глубины закрепления пунктов построений ГДП блока земной коры VI ранга от вероятности определения изменений деформаций

За единицу вероятности приняты изменения деформаций исследуемого блока земной коры, соответствующие глубине закрепления пунктов в 560 м. Зависимость, представленная на рисунке 8, свидетельствует о том, что при определении изменений во времени деформации блока земной коры VI ранга с вероятностью 67 % можно утверждать, что глубина заложения должна быть не менее 300 м (подземные центры, закладываемые в скважины глубокого бурения, горные выработки). Глубинные подземные центры не нашли широкого применения в отечественной практике на техногенных ГДП. Поэтому соискателем предлагается закрепление проводить кустами подземных центров в зонах пересечения разломов на соответствующую глубину его проникновения, включая трубчатый центр с датчиками температуры, закладываемый в обсадную трубу, и дублирующую систему контроля смещений земной коры на основе обратного отвеса. Несомненным достоинством предлагаемой пространственной структурно ориентированной ячейки построений ГДП является наличие значительного количества избыточных изменений, что обеспечивает ее жесткость. Кроме этого, типовой

характер ее построения легко обеспечивает поэтапность построения ГДП и одинаковую точность определения координат пунктов. Таким образом, наиболее распространенной фигурой построений ГДП в Кузбассе предлагается тетраэдр, форма которого будет определяться расположением МП наивысшей точки блока земной коры и узлами пересечением разломов (см. рисунок 5). Таким образом, предложенная модель ячейки имеет следующие ограничения по количеству пунктов: минимальное их число, как мобильных, так и стабильных, – должно быть не менее четырех.

Теоретические обоснования взаимообусловленности и взаимосвязанности системы постоянных наблюдений и оценки динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений (подсистема 2) опираются на цикличность (модуль 2.1) и итерационный подход (модуль 2.2). Началом каждого цикла являются наблюдения, теоретическая основа которых – это моделирование кинематики блоков земной коры. Теоретическое обоснование при моделировании кинематики блоков земной коры, по предложению соискателя, заключается в следующем. Регистрация развития природных и техногенных геодинамических процессов блоков земной коры на МП, образующих пространственную структурную модель ячейки геодезических построений ГДП, основана на прямо пропорциональной зависимости средних квадратических погрешностей (СКП) определения координат МП от скорости изменения во времени деформаций блоков земной коры в год, не приводящих к проявлению ГДЯ (менее $1 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹). Такая связь установлена соискателем с использованием следующего критерия:

$$D[t-t_0]/mD[t-t_0] \geq 3, \quad (6)$$

где $mD[t-t_0] = (m^2 D[t] + m^2 D[t_0])^{0.5}$; $mD[t]$,

$mD[t_0]$ – СКП определения компонентов изменения во времени деформации $\Delta D[t-t_0]$ в эпохи t и t_0 , не приводящие к проявлению ГДЯ.

Для блоков земной коры исследуемых рангов в районе освоения месторождения с помощью разработанной автором программы «ВМ» моделируются изменения во времени деформации в зависимости от их кинематики. На основе указанных зависимостей устанавливаются скорости движения этих блоков в год, соответствующие критерию (3), и характеризующему их геодинамическую активность (таблице 1).

Таблица 1 – Показатели точности определения координат и высот МП

| Ранг блока земной коры | Скорость движения блока земной коры, мм/год | Расчетные СКП определения координат и высот, мм |
|------------------------|---|---|
| II | 158,0 | $\pm 38,0$ |
| III | 40,0 | $\pm 9,5$ |
| IV | 17,0 | $\pm 4,1$ |
| V | 12,3 | $\pm 3,0$ |

Результаты, приведенные в таблице 1, свидетельствуют о том, что геодинамическая активность блоков земной коры разных рангов (превышение скорости деформаций $3 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹) происходит при неодинаковых скоростях их движений. При этом в блоках низших рангов расчетные скорости в 2–3 ниже. Такой подход не применяется в традиционных технологиях. На основе полученных величин средних квадратических погрешностей обосновывается точность определения координат мобильных пунктов построений ГДП.

Регистрация кинематики блоков земной коры, являющаяся основой теории прямой задачи геодезического мониторинга, реализуется взаимно обусловленным комплексом высокоточных повторных геодезических и гравиметрических наблюдений наземными и космическими средствами (геометрическое нивелирование) и спутниковыми методами (по программе ВГС) в блоках земной коры низ-

ших рангов и (по программе ФАГС) – в высших. Итерационный подход для оптимизации профилактических мер основан на моделировании динамических параметров блоков земной коры и заключается в следующем. В общем виде решение системы линейных уравнений (2) по методу наименьших квадратов выражается в виде

$$D[t-t_0] = -R [t_0]^{-1} \Delta R [t-t_0], \quad (7)$$

где $R [t_0]^{-1}$ – обратная матрица $R [t_0]$.

Для нахождения 12 неизвестных в (7) составляется система из 12 нормальных уравнений (для числа пунктов $n = 4$). Эти уравнения представляют собой линейную зависимость между радиусом-вектором пунктов, заложенных в блоке земной коры, и соответствующим радиусом-вектором их смещений; коэффициенты $e_{ij} [t-t_0]$ будут компонентами тензора 2-го ранга. Полученные девять величин $e_{ij} [t-t_0]$ при решении (7) являются компонентами несимметричного тензора второго ранга.

Средняя квадратическая погрешность $me_{ij}[t-t_0]$ имеет следующий вид:

$$me_{ij}[t-t_0] = \mu / (P_{ij})^{0,5}, \quad (8)$$

где μ – СКП единицы веса;

P_{ij} – вес $e_{ij}[t-t_0]$.

Моделирование динамических параметров блоков земной коры соискателем предложено определять последовательно в четыре этапа. Предлагаемый алгоритм в едином цикле позволяет последовательно определять весь спектр динамических параметров исследуемого блока земной коры. Он реализован на алгоритмическом языке *QBASIC* для ПК, а составленная автором программа «ВМ» имеет свидетельство о государственной регистрации. В таблице 2 приведен пример значений величин компонентов изменений во времени деформации блока земной коры VI ранга в районе разреза «Кедровский» и средние квадратические погрешности их определения.

Таблица 2 – Изменения во времени деформации блока земной коры $e_{ij} [t-t_0]$ и СКП их определения $me_{ij} [t-t_0]$

| $e_{ij} [t-t_0]$ | Величина | $me_{ij}[t-t_0]$ | Величина |
|------------------|----------------------|------------------|---------------------|
| e_{11} | $-6,3 \cdot 10^{-6}$ | me_{11} | $3,4 \cdot 10^{-7}$ |
| e_{12} | $4,3 \cdot 10^{-5}$ | me_{12} | $3,6 \cdot 10^{-7}$ |
| e_{13} | $4,6 \cdot 10^{-3}$ | me_{13} | $6,2 \cdot 10^{-6}$ |
| e_{21} | $-5,9 \cdot 10^{-7}$ | me_{21} | $1,6 \cdot 10^{-7}$ |
| e_{22} | $2,3 \cdot 10^{-4}$ | me_{22} | $6,3 \cdot 10^{-7}$ |
| e_{23} | $3,6 \cdot 10^{-3}$ | me_{23} | $2,7 \cdot 10^{-6}$ |
| e_{31} | $-3,8 \cdot 10^{-5}$ | me_{31} | $1,7 \cdot 10^{-6}$ |
| e_{32} | $2,7 \cdot 10^{-4}$ | me_{32} | $1,6 \cdot 10^{-6}$ |
| e_{33} | $4,3 \cdot 10^{-3}$ | me_{33} | $3,0 \cdot 10^{-5}$ |

Повторные наблюдения выполнены через полгода спутниковыми геодезическими приемниками Leica Wild GPS System 200.

Разработка теоретических положений для подсистем взаимодействия системы динамической модели ГМНДСЗК основана на реализации структурно-организационного принципа (подсистема 3), который включает два модуля: структуру (модуль 3.1) и иерархию (модуль 3.2). Для изучения взаимодействия блоков земной коры разных рангов соискателем разработан метод многоступенчатости геодезических построений, определяющий структуру (модуль 3.1). В традиционных технологиях многоступенчатость геодезических построений зависит от площади объекта; при геодинимических исследованиях она применялась только на прогностических полигонах. Соискателем предлагается многоступенчатость построений ГДП в районе освоения месторождения определять в зависимости от геодинимической активности блоков земной коры рангов R и $R + 1$ (их скоростью изменения во времени деформаций более $3 \cdot 10^{-6}$ в год). Геометрические параметры построений определяются масштабами блоков земной коры, при соблюдении принципа от общего к частному. Общий вид критерия геодинимически активного блока земной коры предложен соискателем

$$Ve_{ii}[t-t_0] \geq 3Ve_n[t-t_0], \quad (9)$$

где $Ve_{ii}[t-t_0]$ – скорость деформации исследуемого блока земной коры в год;

$Ve_n[t-t_0]$ – скорость деформации земной коры, не приводящая к проявлению геодинамических явлений, равная $1 \cdot 10^{-6}$ год $^{-1}$.

Основой для построения критерия (9) явились результаты исследований, проведенные учеными Института физики Земли, которые установили, что медленные скорости V_E деформаций земной коры менее $1 \cdot 10^{-6}$ в год не могут приводить к образованию разломов и проявлению ГДЯ. Если неравенство (9) выполняется не только для блоков земной коры в районе освоения месторождения одного ранга R , но и для последующего $R+1$, то это является условием многоступенчатости построений ГДП:

$$\begin{aligned} Ve_{ii}[t-t_0](R) &\geq 3Ve_n[t-t_0]; \\ Ve_{ii}[t-t_0](R+1) &\geq 3Ve_n[t-t_0]. \end{aligned} \quad (10)$$

Критерий (10) определяет многоступенчатость построений ГДП. На рисунке 9 приведена схема таких построений: три пространственных фигуры геодезических построений ГДП относятся к трем блокам земной коры низшего ранга, а совместная фигура – более высокого.

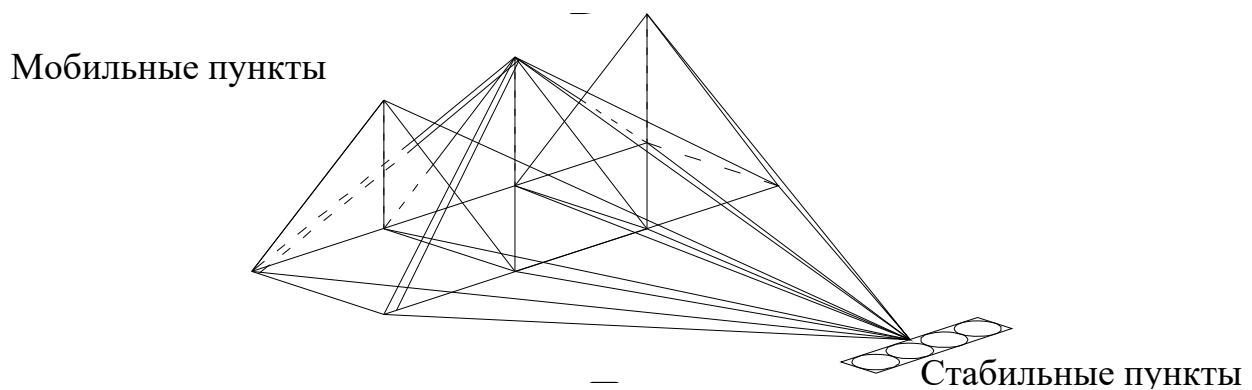


Рисунок 9 – Схема двухступенчатого построения ГДП

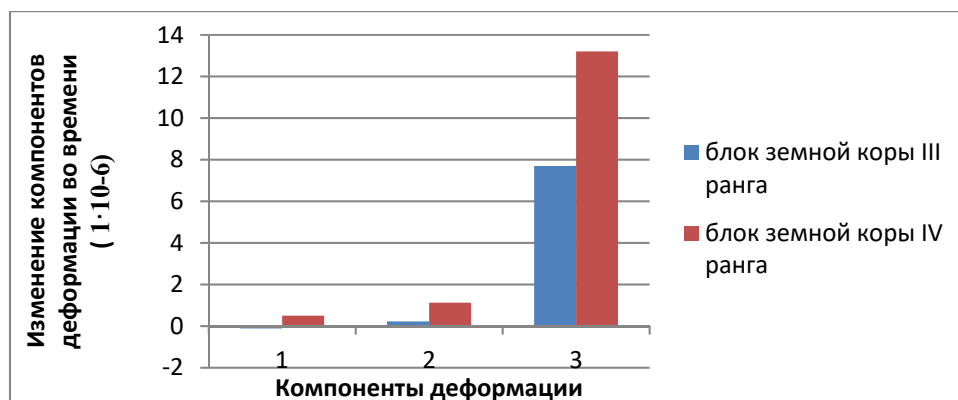
Известно, что многоступенчатые построения приводят к понижению точности координат мобильных пунктов. Для обеспечения равноточности определения координат соискателем предложена типовая схема не только сети мобильных пунктов для каждого блока земной коры, но и их связи со стабильными пунктами ГДП. Такая типовая схема связи мобильных пунктов блока земной коры со стабильными рекомендована автором при проведении не только однородных спутниковых наблюдений, но и комплексных геодезических наблюдений, включая гравиметрические (см. рисунок 9). Реализация метода многоступенчатости геодезических построений на ГДП учитывает обеспечение одинаковой точности определения координат мобильных пунктов каждого блока земной коры на основе предложенной типовой схемы связи их со стабильными, которая является унифицированной и гибкой для реализации, и рекомендуется для проведения комбинированных наблюдений. Данный подход характеризует поэтапность реализации динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений (от детального уровня к локальному и затем к региональному на основе критерия (10)) и обеспечивает экономический эффект.

С развитием многоуровневых геодезических построений на ГДП тесно связана задача разработки теоретических положений учета иерархии строения земной коры (модуль 3.2) (см. рисунок 6), решение которой кардинально меняет традиционный подход к кинематике пунктов. Смещения каждого из этих пунктов, координаты которого $X[t_0]$, $Y[t_0]$ и $H[t_0]$ на эпоху t_0 , трактуемые далее, как их изменения во времени $\Delta X_i(r_i)[t-t_0]$, $\Delta Y_i(r_i)[t-t_0]$ и $\Delta H_i(r_i)[t-t_0]$, представим в виде двух слагаемых: переменного и постоянного. Переменные слагаемые обусловлены соответствующим изменением напряженно-деформированного состояния блока земной коры ранга $r(i)$; изменения во времени координат $\Delta X_i(r_i)[t-t_0]$, $\Delta Y_i(r_i)[t-t_0]$ и $\Delta H_i(r_i)[t-t_0]$ обусловлены соответствующими изменениями напряженно-деформированного состояния указанного блока и равны

$$\begin{aligned}\Delta X_i(r_i)[t-t_0] &= X[t_0]e_{11}(r_i)[t-t_0] + Y[t_0]e_{12}(r_i)[t-t_0] + H[t_0]e_{13}(r_i)[t-t_0]; \\ \Delta Y_i(r_i)[t-t_0] &= X[t_0]e_{21}(r_i)[t-t_0] + Y[t_0]e_{22}(r_i)[t-t_0] + H[t_0]e_{23}(r_i)[t-t_0]; \\ \Delta H_i(r_i)[t-t_0] &= X[t_0]e_{31}(r_i)[t-t_0] + Y[t_0]e_{32}(r_i)[t-t_0] + H[t_0]e_{33}(r_i)[t-t_0],\end{aligned}\quad (11)$$

где $e_{13}r(i)[t-t_0]$, $e_{12}r(i)[t-t_0]$, $e_{11}r(i)[t-t_0]$, $e_{21}r(i)[t-t_0]$, $e_{22}r(i)[t-t_0]$, $e_{23}r(i)[t-t_0]$, $e_{31}r(i)[t-t_0]$, $e_{32}r(i)[t-t_0]$ и $e_{33}r(i)[t-t_0]$ – изменения компонентов деформации во времени блока земной коры ранга $r(i)$ за период $[t-t_0]$.

Для четырех исследуемых блоков земной коры III–VI рангов, расположенных юго-западнее города Белово, имеющих скорость движения до 3 мм/год, с помощью программы «ВМ» соискателем были получены изменения их компонентов деформации во времени (рисунок 10).



1 – $e_{11}[t-t_0]$; 2 – $e_{12}[t-t_0]$; 3 – $e_{13}[t-t_0]$

Рисунок 10 – Изменения компонентов деформации во времени блоков земной коры III–IV рангов

Изменения компонентов деформации во времени ($1 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$) блоков земной коры разных рангов подтверждают закономерности деформационных процессов от иерархии строения земной коры, установленные академиком Садовским М. А. и Писаренко В. Ф.: в блоках III ранга они значительно меньше, чем в IV (то есть, обратно пропорционально рангу) (см. рисунок 10).

Оценка влияния изменения напряженно-деформированного состояния блоков земной коры III–VI рангов на изменение во времени отметки координат

пункта выполнена по разработанной соискателем программе «ВМ» и проиллюстрирована на рисунке 11.

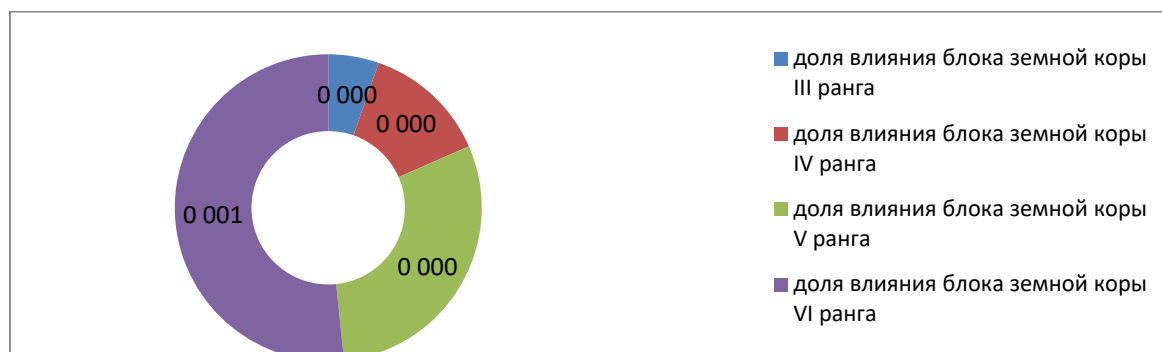


Рисунок 11 – Доля влияния изменений напряженно-деформированного состояния блоков земной коры разных рангов на изменение во времени отметки пункта

Результаты, приведенные на рисунке 11, свидетельствуют о том, что выбор условно стабильного пункта и места его заложения определяет достоверность геодинамических исследований, влияние этого фактора значительно и может достигать в зависимости от ранга блока земной коры до 52 % от изменения во времени его отметки. Количество стабильных пунктов рекомендуется выбирать не менее четырех, что определяется корректностью обеспечения связи между системами координат при применении спутниковых технологий. Однако их закрепление предлагается проводить в условно стабильном блоке земной коры. Выделение условно стабильного блока земной коры основано на реализации фундаментальной гипотезы о действии и релаксации напряжений. При этом его выбор основывается на минимуме вертикальных движений относительно соседних. Такую информацию легко можно получить при его выделении по картографическим материалам. Условно стабильный блок земной коры предлагается выделять из нескольких (в общем случае n) блоков одного ранга на основе выполнения критерия $[vv] = \min$, (где v – разности наивысших отметок блоков земной

коры). Закрепление мобильных пунктов сети ГДП предлагается проводить кустами с подземными центрами разной глубины заложения с датчиками для регистрации температуры, что позволит получить более подробную информацию о количественных характеристиках движений блоков земной коры.

Разработка теоретических положений для реализации подсистемы контроля, прогноза напряженно-деформированного состояния блоков земной коры базируется на целевом принципе (подсистема 1). Главной целью динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений является разработка прогноза НДС блоков земной коры на основе функционального зонирования, в рамках которого устанавливается степень опасности его развития и возможный риск проявления ГДЯ. По степени опасности развития НДС блоки земной коры автором предлагается подразделять на четыре группы (класса) (таблица 3).

Таблица 3 – Степень опасности развития деформаций блока земной коры от изменения во времени динамических параметров

| Класс степени опасности | Величина динамического параметра |
|---|---|
| I геодинамически неактивный блок земной коры (ГНАБ ЗК) | Изменения во времени компонентов деформаций менее $3,0 \cdot 10^{-6}$ в год |
| II геодинамически активный блок земной коры (ГАБ ЗК) | Изменения во времени компонентов деформаций более $3,0 \cdot 10^{-6}$ в год |
| III ГАБ ЗК, в котором формируется очаг геодинамического явления (ФО ГДЯ) | Изменения во времени компонентов деформаций от $15,0 \cdot 10^{-6}$ до $22,4 \cdot 10^{-6}$ в год |
| IV ГАБ ЗК, в котором сформирован очаг геодинамического явления (О ГДЯ) или произошло проявление ГДЯ | Изменения во времени компонентов деформаций свыше $22,4 \cdot 10^{-6}$ в год |

Установление степени опасности развития деформаций блока земной коры соискателем предложено выполнять по величине изменений во времени динамических параметров. Величины изменений во времени динамических параметров блока земной коры для установления III и IV степени опасности получены с учетом результатов исследований Кольского научного центра РАН, Садовского М. А. и ряда других авторов, которые обосновали, что проявление геодинамического явления при очаге в глубине массива горных пород возможно при плотности энергии не менее $12 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{м}^3$. Поэтому при установлении III степени опасности минимальное значение изменений во времени компонентов деформаций принято в размере 0,67 от указанной величины.

Другой метод функционального зонирования, обеспечивающий оценку возможного риска проявления ГДЯ, включает экспертный анализ степени опасности O и степени уязвимости $У$, и количественно выражается коэффициентом риска P

$$P = OУ. \quad (12)$$

В ходе выполненных исследований установлена степень возможного риска проявления ГДЯ разрушительного характера по величине P : малая – не более 0,15 (ГМНДСЗК функционирует успешно); умеренная – от 0,15 до 0,3 (ГМНДСЗК функционирует с небольшими отклонениями); большая – от 0,3 до 0,5 (ГМНДСЗК функционирует эпизодически); критическая – свыше 0,5 (ГМНДСЗК не функционирует).

Кроме профилактических мер (модуль 1.1), целевой принцип реализации динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений нацелен на решение исследовательских задач (модуль 1.2), которые включают как фундаментальную, так и прикладные задачи: определение типа геодинамической ситуации; контроль изменения во времени главных направлений деформаций блоков земной коры; ранжирование изменений во времени деформаций

блоков земной коры; контроль накопления потенциальной энергии деформирования блоков земной коры.

Тип геодинамической ситуации позволяет оценить относительное изменение во времени объема блока земной коры $\theta[t-t_0]$ (называемое дилатацией), которая равна

$$\theta[t-t_0] = e_{11}[t-t_0] + e_{22}[t-t_0] + e_{33}[t-t_0], \quad (13)$$

где $e_{11}[t-t_0]$, $e_{22}[t-t_0]$ и $e_{33}[t-t_0]$ – компоненты тензора деформаций, описываемые с помощью уравнений Коши согласно (2)

Основными её типами являются зона сжатия, зона растяжения и зона сдвига. Выделение зоны сдвига производится на основе выполнения условия

$$\Delta\gamma_{\text{рез}}[t-t_0] > \theta[t-t_0], \quad (14)$$

где $\Delta\gamma_{\text{рез}}[t-t_0] = (\Delta\gamma_{xy}^2[t-t_0] + \Delta\gamma_{yz}^2[t-t_0] + \Delta\gamma_{zx}^2[t-t_0])^{0.5}$.

При невыполнении условия (14) выделяются зоны сжатия или растяжения. Условием зоны растяжения являются следующие положительные значения изменений во времени дилатации

$$\theta[t-t_0] > 3Ve_n[t-t_0]. \quad (15)$$

Зона сжатия выделяется при следующих отрицательных значениях изменений во времени дилатации

$$\theta[t-t_0] < -3Ve_n[t-t_0]. \quad (16)$$

где $Ve_n[t-t_0]$ – скорости деформаций земной коры, не приводящие к проявлению ГДЯ.

Ранжирование изменений во времени деформаций блоков земной коры соискателем предложено на основе учета методологии (11).

Контроль изменения во времени главных направлений деформаций блоков земной коры. Для нахождения главных значений деформаций $\varepsilon_1[t-t_0]$, $\varepsilon_2[t-t_0]$, $\varepsilon_3[t-t_0]$ выражение матрицы-вектора (7) представляется в следующем виде:

$$(D[t-t_0]-D_0)X[t_0] = 0, \quad (17)$$

где $D_0 = \lambda EM$;

λ – собственное (главное) значение;

EM – единичная диагональная матрица.

Контроль накопления потенциальной энергии деформирования блоков земной коры. Изменение во времени энергетического состояния блока земной коры $dE[t-t_0]$ за период $[t-t_0]$ определяется потенциальной энергией деформации, которая рассчитывается по полученным компонентам тензора изменений во времени напряжений $\sigma_{ij}[t-t_0]$ и изменений во времени деформаций $e_{ij}[t-t_0]$. Таким образом, изменение во времени энергетического состояния $dE[t-t_0]$ блока земной коры объемом V за период $[t-t_0]$ будет равно

$$dE[t-t_0] = [1/E \sum (\sigma_{ii}[t-t_0])^2 + 1/G \sum (\tau_{ij}[t-t_0])^2] V. \quad (18)$$

Контроль накопления потенциальной энергии деформирования блоков земной коры рангов (9) и закономерности ее перераспределения в блоках земной коры разных рангов (фундаментальная задача геодинамики месторождения) осуществляется путем оценки их предельного энергонасыщения и имеет следующий вид:

$$dE[t-t_0] > E_0, \quad (19)$$

где $E_0 = e_y V$;

e_y – предельная энергоемкость.

В предлагаемых автором методах оценивается степень опасности развития НДС блоков земной коры и степень возможного риска проявления ГДЯ, на основе

которых разрабатываются профилактические мероприятия и контроль их состояния, что является коренным отличием от существующих. Система управления динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений начинает действовать, когда установлена II степень опасности развития деформаций блока земной коры. В этом случае необходим контроль геодинамической активности соседних блоков земной коры такого же ранга, критерием которого является неравенство (9). При этом указанная модель развивается в пространстве или расширяется по территории. При расширении геодинамической активности за границы блоков одного ранга r потребуются многоуровневые построения ГДП, опирающиеся на действие критерия (10). При установлении III степени опасности развития деформаций блока земной коры происходит развитие динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений во времени, т. е. изменяется частота опроса (3). Анализ выполненных результатов исследований свидетельствует о необходимости совершенствования и развития динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений при степени возможного риска проявления ГДЯ разрушительного характера, то есть $P > 0,3$. Кроме этого, выполнение критерия (10) и требований к точности определения координат и высот мобильных пунктов на ГДП (см. таблицу 1) потребует развития и совершенствования, прежде всего, подсистем 1.1, 1.2, 3.1, 3.2, 4.2, 5.1 (см. рисунок 6).

Разработка теоретических положений подсистемы частоты наблюдений и сбора информации во времени базируется на временном принципе (подсистема 5). В его основу (3) положен учет медленных скоростей земной коры (9), не приводящих к проявлению ГДЯ, что является коренным отличием от существующих подходов. На основании выполненных исследований сделан вывод о том, что разработанная автором динамическая модель ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений, базирующаяся на новых теоретических и информационных принципах, позволяет расширить и унифицировать решение задач геодинамической безопасности месторождения, что является кардинальным отличием от традиционных технологий.

В четвертом разделе «Практическая реализация теоретического обоснования применимости разработанной методологии для решения фундаментальной и прикладных задач геодинамики угольных месторождений на примере Кузбасса» изучены методические возможности для решения прикладной и фундаментальной задачи на ряде шахт Кузбасса. Решение подобных задач не может быть в полной мере выполнено с применением традиционных геодезических технологий. В достаточно полной мере это может быть реализовано на новом методологическом подходе, базирующемся на новых теоретических и информационных принципах.

Прикладные задачи геодинамики месторождения.

1. Контроль типа геодинамической ситуации. На исследуемой территории в районе города Кемерово (рисунок 12) соискателем выделены зоны сдвига как для блока земной коры IV ранга 42:2019:03:04:00000000281 ($\Delta\gamma_{рез}[t-t_0] = -6,56 \cdot 10^{-7}$; $\theta[t-t_0] = -2,53 \cdot 10^{-7}$) (выделен красным цветом), так и для двух блоков земной коры V ранга (блок III – 42:2019:03:05:000000002256 $\Delta\gamma_{рез}[t-t_0] = 2,085 \cdot 10^{-6}$; $\theta[t-t_0] = 1,44 \cdot 10^{-6}$; блок II – 42:2019:03:05:000000003257 $\Delta\gamma_{рез}[t-t_0] = 2,25 \cdot 10^{-5}$; $\theta[t-t_0] = 4,20 \cdot 10^{-6}$).

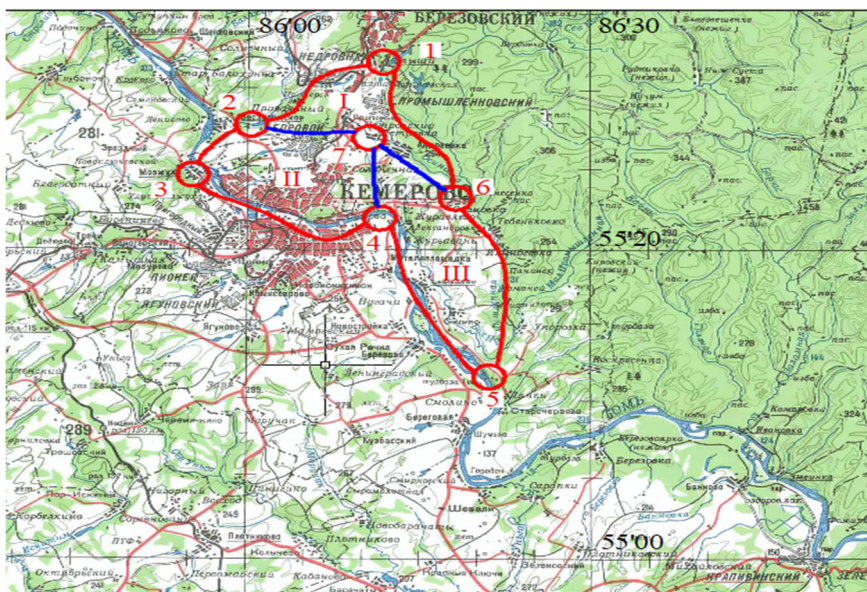


Рисунок 12 – Блоки земной коры IV и V рангов ГДП КемГУ

Согласно (15) и (16) блок земной коры V ранга I–42:2019:03:05:000000001281 характеризуется как зона растяжения $\Delta\gamma_{\text{рез}}[t-t_0]=7,10\cdot 10^{-7}$; $\theta[t-t_0]=3,03\cdot 10^{-6}$.

2. Контроль изменений во времени ориентирования главных осей деформаций блоков земной коры в районе месторождения включает определение изменений во времени значений главных деформаций и их направлений блока земной коры за период повторных наблюдений. Исследуемые блоки земной коры характеризуются следующими изменениями во времени значений главных деформаций: блок 42:2019:03:04:000000000281 $\varepsilon_1[t-t_0]=-2,41\cdot 10^{-11}$, $\varepsilon_2[t-t_0]=2,52\cdot 10^{-6}$, $\varepsilon_3[t-t_0]=-5,44\cdot 10^{-14}$; блок 42:2019:03:05:000000001281 $\varepsilon_1[t-t_0]=-3,01\cdot 10^{-6}$, $\varepsilon_2[t-t_0]=1,35\cdot 10^{-12}$, $\varepsilon_3[t-t_0]=-2,10\cdot 10^{-13}$; блок 42:2019:03:05:000000002256 $\varepsilon_1[t-t_0]=-3,02\cdot 10^{-14}$, $\varepsilon_2[t-t_0]=1,44\cdot 10^{-6}$, $\varepsilon_3[t-t_0]=1,37\cdot 10^{-12}$; блок 42:2019:03:05:000000003257 $\varepsilon_1[t-t_0]=-4,02\cdot 10^{-6}$, $\varepsilon_2[t-t_0]=2,42\cdot 10^{-10}$, $\varepsilon_3[t-t_0]=7,06\cdot 10^{-13}$.

3. Контроль накопления потенциальной энергии деформирования блоков земной коры рангов и закономерности ее перераспределения в блоках земной коры разных рангов (фундаментальная задача геодинамики месторождения) основан на оценке их предельного энергонасыщения. На исследуемой территории в районе города Кемерово соискателем определены следующие изменения потенциальной энергии: в блоке земной коры IV ранга $5,57\cdot 10^9$ Дж; для блоков земной коры V ранга $2,67\cdot 10^{10}$, $2,95\cdot 10^{12}$ и $1,06\cdot 10^{10}$ Дж соответственно. Уровень накопления потенциальной энергии в блоке земной коры объёмом V , превышающий предельный запас упругой энергии E_0 , определяется критерием формирования очага ГДЯ блочного массива горных пород месторождения (при плотности энергии не менее $12 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{м}^3$, для исследуемых блоков земной коры V ранга 0,21, 9,1 и $0,09 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{м}^3$).

Полученные соискателем результаты решения фундаментальной задачи геодинамики месторождения свидетельствуют о том, что наибольшие значения изменения плотности потенциальной энергии характерны для блока земной коры

V ранга, который подработан горными работами шахт «Северная» и «Бутовская», однако очаг ГДЯ в нем еще не сформирован. Для других территорий соискателем получены близкие количественные величины. Так, например, для блока земной коры в районе шахты «Первомайская» изменение потенциальной энергии равно $5,14 \cdot 10^{10}$ Дж, что свидетельствует о возможности горного удара; на разрезе «Вахрушевразрезуголь» для блока земной коры VI ранга – это изменение составило $2,32 \cdot 10^8$ Дж, что указывает на целесообразность и необходимость разработки и реализации ГМНДСЗК как инструмента по профилактике ГДЯ на угледобывающих предприятиях Кузбасса. Это подтверждают и реальные объемы затрат. Так для шахты со среднегодовой добычей угля 500 000 т и отпускной его цене в 2 000 руб. возможный ущерб даже при 3-процентном уровне риска равен 30 млн руб., а затраты на создание и функционирование ГМНДСЗК экспертно оцениваются в 10 млн руб.

Анализ степени возможного риска проявления ГДЯ в блоках земной коры на основе результатов проведения ГМНДСЗК выполнен соискателем для четырех угольных шахт Кузбасса. Геодезической основой ГМНДСЗК для всех шахт является типовая схема связи МП со стабильными пунктами. Исследуемые шахты характеризуются не только расположением в разных частях Кузбасса, но и проведением ГМНДСЗК на блоках земной коры разных рангов (для шахты «Коксовая» и ООО «Шахтоуправление «Карагайлинское» – блока земной коры IV ранга, а в блоке земной коры V ранга для шахт «Бутовская» и «Красноярская»). Повторные наблюдения на исследуемых территориях выполнены спутниковыми геодезическими методами. Степень возможного риска проявления ГДЯ на исследуемых шахтах: для шахты «Коксовая» и ООО «Шахтоуправление «Карагайлинское» – большая ($P = 0,35$); «Бутовская» – умеренная ($P = 0,26$) и «Красноярская» – малая ($P = 0,12$). Результаты выполненных исследований обеспечивают не только связь кинематики с параметрами проявления ГДЯ, но и унифицированность прикладных геодинимических исследований, возмож-

ность управления территориальным и временным развитием ГДП на шахте «Коксовая», «Бутовская» и ООО «Шахтоуправление «Карагайлинское», а также степенью риска проявления ГДЯ разрушительного характера путем реализации профилактических мер по соответствующим показателям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате решения поставленных задач получены следующие основные научные и практические результаты.

1 Выполнен анализ проблемной ситуации, заключающейся в существовании объективного противоречия между передовыми технологическими возможностями геодезической науки и недостаточностью полноценных теоретических разработок и моделей в области сбора, регистрации, обработки и анализа изменений состояния земной коры в районах освоения угольных месторождений, что позволило сформулировать задачи диссертационного исследования.

2 Обоснованы содержание и введены в научный оборот новые концептуальные понятия: «динамические параметры блока земной коры» и «пространственная структурная модель ячейки геодезических построений ГДП», что позволило сформулировать задачи геодинамики месторождения.

3 Теоретически обоснован новый методологический подход, базирующийся на новых теоретических и информационных принципах при реализации динамической модели ГМНДСЗК с целью формирования полноценной системы сбора информации о напряженно-деформированном состоянии блоков земной коры разных рангов, что позволяет внедрить на угледобывающих предприятиях новый подход к исследованию их геодинамики.

4 Разработаны теоретические основы контроля напряженно-деформированного состояния блоков земной коры для формирования прогнозных оценок их раз-

вития с последующей выработкой профилактических мер и рекомендаций для реализации динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений, что обеспечивает решение задач геодинамической безопасности.

5 Теоретически обоснована взаимосвязанность и взаимообусловленность системы постоянных наблюдений, оценки, прогноза и контроля для реализации динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений, что обеспечивает повышение точности и надежности результатов наблюдений, более надежное и адресное определение состояния структур земной коры, последовательных прогнозов и прогнозных рекомендаций, более оптимальные последовательные профилактические меры.

6 Теоретически обоснованы основные положения взаимодействия между подсистемами динамической модели ГМНДСЗК и с другими системами, базирующиеся на новом структурно-организационном принципе, учитывающем иерархию и структуру земной коры, что повышает её адекватность структурам земной коры и достоверность регистрации проявлений геодинамических процессов.

7 Теоретически обоснована пространственная структурная модель ячейки построений ГДП как типовой основы многоуровневых геодезических построений и получения информации для создания динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений, что обеспечивает поэтапность создания, типовую структуру и экономическую эффективность.

8 Теоретически обоснована частота наблюдений и сбора информации во времени для реализации динамической модели ГМНДСЗК в районах освоения угольных месторождений, что обеспечивает управление её развитием.

9 Теоретически обоснована применимость разработанной динамической модели ГМНДСЗК для решения фундаментальной и прикладных задач геодинамики месторождения.

Результаты диссертационного исследования рекомендуются к использованию при изучении природных и антропогенных геодинамических процессов,

проектировании и разработке систем управления состояния окружающей среды, освоении угольных бассейнов Российской Федерации.

Перспективы дальнейших исследований по данной тематике заключаются в расширении геодезических методов изучения геодинамики угольных месторождений в направлении развития как геодезических построений, так и систем геодезического мониторинга.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Соловицкий, А. Н. О геодинамической безопасности при освоении недр Кузбасса / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 1. – С. 291–293.

2 Соловицкий, А. Н. О мониторинге деформаций земной коры при подземной геотехнологии освоения недр / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Маркшейдерия и недропользование. – 2011. – № 3. – С. 53–55.

3 Соловицкий, А. Н. Об особенностях формирования системы контроля деформаций блоков земной коры при освоении угольных месторождений Кузбасса / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2012. – № 10. – С. 13–16.

4 Соловицкий, А. Н. Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры в районах освоения угольных месторождений: точность регистрации и определения координат / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2016. – № 4 (36). – С. 16–22.

5 Соловицкий, А. Н. Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры в районах освоения угольных месторождений: геодезические построения / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2017. – № 1 (37). – С. 81–89.

6 Соловицкий, А. Н. Теория высот при изучении геодинамики земной коры / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 34–42.

7 Соловицкий, А. Н. Функциональное зонирование – инструмент управления развитием геодинамического полигона при изучении геодинамики земной коры / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 100–109.

8 Соловицкий, А. Н. Геоинформационное обеспечение геодезического мониторинга геодинамики земной коры в районах освоения угольных месторождений: требования для проектирования / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – № 3. – С. 333–340.

9 Каленицкий, А. И. О развитии многоуровневых построений на геодинамическом полигоне при освоении недр Кузбасса / А. И. Каленицкий, А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 45–55. – Doi: 10.33764/2411-1759-2019-24-2-45-55.

10 Каленицкий, А. И. О методологическом аспекте геодезического мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры при освоении недр Кузбасса / А. И. Каленицкий, А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 20–33. – Doi: 10.33764/2411-1759-2019-24-2-20-33.

11 Соловицкий, А. Н. О фундаментальной задаче геодинамики угольного месторождения при проведении геодезического мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2021. – Т. 65. – № 2. – С. 147–151.

12 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ ОТО № 2003611192 Российская Федерация / А. Н. Соловицкий; заявитель и правообладатель А. Н. Соловицкий (RU); дата поступления 27.03.2003; дата регистрации 22.05.2003. – Текст : непосредственный.

13 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РТ № 2003611001 Российская Федерация / А. Н. Соловицкий; заявитель и правообладатель Кузб. гос. техн. ун-т (RU); дата поступления 07.03.2003; дата регистрации 24.04.2003. – Текст : непосредственный.

14 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ ВМ № 2004610007 Российская Федерация / А. Н. Соловицкий; заявитель и правообладатель Кузб. гос. техн. ун-т (RU); дата поступления 22.10.2003; дата регистрации 05.01.2004. – Текст : непосредственный.

15 Solovitskiy, A. Dynamic models of deformation of crustal blocks in the area of development of coal deposits - the basis of the information security of their development / A. Solovitskiy. – Текст : непосредственный // 8th Russian-Chinese Symposium. Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety. – September. <http://www.atlantis-press.com/php/pub.php?publication=coal-16>.

16 Solovitskiy, A. N. Digital cartographic support of geodynamic safety of subsoil use based on UAV technologies. / A. N. Solovitskiy. – Текст : непосредственный // E3S Web of Conferences. Open Access proceedings in Environment, Energy and Earth Sciences. 2019.07001

17 Solovitskiy, A. N. The Hierarchy of Development of Geodynamic Processes of the Earth's Crust During the Development of Kuzbass Deposits To cite this article: A. N. Solovitskiy 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 272 022020. – Текст : непосредственный.

18 Соловицкий, А. Н. Мониторинг геодинамических явлений разрушительного характера при освоении месторождений / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 2. – С. 28–31.

19 Каленицкий, А. И. Оценка изменений во времени деформаций блоков земной коры при освоении угольных месторождения Кузбасса / А. И. Каленицкий, А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2011.

VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 157–160.

20 Соловицкий, А. Н. Оценка возможного риска проявления геодинамических явлений при освоении месторождений Кузбасса / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Сборник научных статей XIV Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», 1–2 ноября 2012 г. – Кемерово : КузГТУ, 2012. – Т. 1 – С. 58–61.

21 Карпик, А. П. Новый этап развития геодезии – переход к изучению деформаций блоков земной коры в районах освоения месторождений / А. П. Карпик, А. И. Каленицкий, А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГГА. – 2013. – № 3 (23). – С. 3–9.

22 Карпик, А. П. Технология изучения изменений во времени деформаций блоков земной коры при освоении месторождений Кузбасса / А. П. Карпик, А. И. Каленицкий, А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГГА. – 2013. – № 4 (24). – С. 3–11.

23 Каленицкий, А. И. О едином пространстве деформаций земной коры и её поверхности при освоении месторождений Кузбасса / А. И. Каленицкий, А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 164–168.

24 Соловицкий, А. Н. О применении результатов геодезического мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры при освоении угольных месторождений Кузбасса / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // International Research Journal. – 2016. – № 5(47). – Часть 6. – С. 97–99.

25 Соловицкий, А. Н. О горизонтальных движениях земной коры с учетом иерархии её строения / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Сборник научных статей Международной научной конференции «Высокие технологии

и инновации в науке». 28 марта 2019. – Санкт-Петербург : ГНИИ «Нацразвитие», 2019. – С. 37–43.

26 Соловицкий, А. Н. Геоинформационное обеспечение проектирования геодезического мониторинга деформаций земной коры в Кузбассе / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Сборник научных статей Международной научной конференции «Высокие технологии и инновации в науке». 28 марта 2019. – Санкт-Петербург : ГНИИ «Нацразвитие», 2019. – С. 44–49.

27 Соловицкий, А. Н. О новых принципах геодезического мониторинга напряженно-деформированного состояния блоков земной коры в районах освоения угольных месторождений Кузбасса / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // Сборник научных статей Международной научной конференции «Technical and natural sciences», 27 августа 2020. – Санкт-Петербург : ГНИИ «Нацразвитие», 2020. – С. 20–24.

28 Соловицкий, А. Н. О решении задач геодинамики угольных месторождений Кузбасса геодезическим методом / А. Н. Соловицкий. – Текст : непосредственный // International Research Journal. – 2020. – № 11 (101). – Часть 2. – С. 76–80.