

ГОРНАЯ ИНФОРМАТИКА

УДК 622 + 55 : 531

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ НЕЛИНЕЙНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ.

ЧАСТЬ I: СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И МЕТОД ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИОННО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

В. П. Потапов¹, В. Н. Опарин², Л. С. Миков¹, С. Е. Попов¹

¹Институт вычислительных технологий СО РАН (Кемеровский филиал),
E-mail: ict@ict.nsc.ru, ул. Рукавишниковая, 21, 650025, г. Кемерово, Россия

²Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН,
E-mail: oparin@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Предлагается новый методологический подход к созданию современных комплексных систем спутникового мониторинга изучения этапов формирования очаговых зон природных и техногенных катастрофических событий на крупномасштабных объектах недропользования Сибири, основанный на мультимодальности экспериментальных геомеханико-геодинамических данных дистанционного зондирования поверхности Земли и технологиях цифровых фабрик. Это позволяет вести их разработку с ориентацией на различные профильные прикладные горно-технологические аспекты с учетом перехода на обработку и анализ больших данных о медленных деформационно-волновых процессах с позиций нелинейной “геомеханической термодинамики”.

Описан метод оценки подвижности поверхности земной коры в районе угольного Кузбасса на основе расчетов полей линеаментов с использованием профильных спутниковых радарных данных дистанционного зондирования Земли. Представлен программный комплекс для осуществления применяемой геоинформационной технологии с результатами тестирования на примере одного из катастрофических оползневых проявлений на объекте крупномасштабного недропользования с открытой разработкой угольного месторождения в привязке к термодинамическим периодам геомеханического состояния мониторингового объекта.

Задачи нелинейной геомеханики, линеаментный анализ, термодинамические периоды формирования очаговых зон локализации деформаций, геоинформационные технологии, спутниковые данные дистанционного зондирования Земли, деструктивные процессы, диагностика, прогнозирование, угольные месторождения, катастрофические оползневые явления, открытые горные работы

DOI: 10.15372/FTPRPI20220316

Роль горнодобывающего комплекса России в стратегии развития базообразующих энергетического, горно-металлургического и химико-технологического направлений в промышленности общеизвестна, как и необходимость обеспечения устойчивого их функционирования на длительную перспективу [1]. Большое, нередко экологически негативное влияние на окружающую среду оказывают горнодобывающие работы по крупномасштабному освоению месторождений Сибири. Так, разработка угольных месторождений открытыми (до 60 %) и подземными (до 40 %) технологиями связана с необходимостью учитывать при оценке их экономической эффективности не только требования энергетического ресурсосбережения за счет новых технологических решений, особенно при возрастающих глубинах ведения горных работ в сложных горно-геологических и природно-климатических условиях, но и требования минимизации экологического ущерба для среды обитания животного и растительного мира на больших территориях с горными отводами [2].

Особую опасность несут природно-техногенные катастрофы, в том числе оползневые явления, из-за недостаточности фундаментальных знаний по механизмам взаимодействия продуктивных пластов и вмещающих породных массивов при техногенном воздействии в сейсмически активных районах Земли. К ним относится и Кузнецкий угольный бассейн со стратегически важными запасами высококачественного угля [1], добываемого преимущественно открытыми геотехнологиями.

Разномасштабность и многофакторность влияния природных и техногенных факторов при разработке месторождений полезных ископаемых в таких условиях с позиций безопасного недропользования позволяют рассматривать изучение особенностей формирования и проявления крупномасштабных оползневых процессов при открытой добыче полезных ископаемых как фундаментальную тематику для построения теории прогнозирования и профилактики природно-техногенных катастроф. Это актуально для обеспечения безопасного крупномасштабного недропользования [2] и в геоэкологическом аспекте.

Без привлечения возможностей современных спутниковых методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационных технологий Big DATA решение подобного уровня задач становится невозможным. Получение большого потока информации, оперативная ее обработка и наглядное представление в заданных форматах предполагает наличие методологии ее комплексной интерпретации на базе соответствующих методов, профильных для решаемых практических задач. Обозначим лишь основные составляющие такой системы интерпретации спутниковых данных, используемых при геомеханической интерпретации результатов линейментного анализа эволюции очаговых зон концентрации напряжений и деформаций на крупномасштабном объекте недропользования, с последующим катастрофического вида оползневым проявлением в Кузбассе.

В данной работе, состоящей из двух частей, представлены: новые методы построения распределенных геопорталов, обеспечивающих интеграцию различных информационных ресурсов с учетом особенностей решаемых задач по оценке геомеханико-геодинамических процессов и изменений окружающей среды горнопромышленных регионов; модели метаданных, базы геоданных, модели облачных вычислений и базовые слои электронных карт для типового геопортала горнопромышленных регионов Сибири с ее многообразием по природно-климатическим, геотектоническим, структурно-геологическим и горно-техническим условиям недропользования. Основное внимание уделено разработке и натурному тестированию нового метода количественной оценки природной и техногенной геодинамической активности на основе расчетов полей линейментов с использованием спутниковых данных дистанционного зондирования Земли.

ВОЛНЫ МАЯТНИКОВОГО ТИПА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПЕРИОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГОВЫХ ЗОН РАЗРУШЕНИЯ В МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД

В [3] отмечается, что этапными в создании экспериментально-теоретических основ нелинейной геомеханики и геофизики явились 80–90-е гг. XX в., когда учеными ИГД СО РАН и Спецпроекта ИФЗ им. О. Ю. Шмидта АН СССР было открыто явление знакопеременной реакции горных пород на взрывные (динамические) воздействия. Это позволило впоследствии теоретически предсказать и экспериментально доказать существование в массивах горных пород нелинейных упругих волн — волн маятникового типа. Отличительная особенность данного типа волн состоит в том, что их вещественными носителями являются конкретные по размеру структурные элементы породных массивов и геоматериалов за счет их колебательных движений как абсолютно твердых тел. Полученное кинематическое выражение для маятниковых волн позволило рассматривать сейсмический процесс не как вероятностный, а как детерминированный [4]. По аналогии с известными видами температур, количественно описываемых кинетической теорией газов, в [5] введено понятие “геомеханическая температура” — для некоторого объема массива горных пород блочно-иерархического строения. За основу бралась величина, пропорциональная средней кинетической энергии структурных элементов для соответствующего объема горных пород (геоблоков) в приближении абсолютно твердых тел.

В качестве основных предпосылок, которые свидетельствуют о целесообразности введения нового понятия “геомеханическая температура”, служат именно геомеханические открытия [1–4]. Здесь уместно напомнить о существовании явления знакопеременной реакции горных пород на взрывные воздействия в напряженных массивах горных пород, обладающих иерархической геоблоковой структурой [3, 5]. Сущность явления заключается в том, что при образовании полостей внутри массивов горных пород посредством мощных (в том числе ядерных) взрывов в их окрестностях происходят знакопеременные смещения между геоблоками, колебательные движения друг относительно друга, обусловленные стесненным поворотом и трансляционным движением породных блоков разного иерархического уровня, зависящего от размеров образующихся полостей и энергии взрывов. Эта формулировка фундаментального результата привела к постановке принципиально новых задач для последовавших теоретических, экспериментальных и прикладных исследований [1].

В частности, была выдвинута гипотеза о возможности существования в напряженных массивах горных пород неизвестных ранее нелинейных упругих волн маятникового типа. Их вещественными носителями являются не абстрактные математические элементарные объемы, а реальные структурные элементы (геоблоки) геологического вещества в приближении абсолютно твердых тел. Для их регистрации и теоретического анализа успешно проводились исследования и разработки в ряде институтов СО РАН в рамках интеграционных проектов под руководством В. Н. Опарина.

Классические виды температур и геомеханическая температура. Отмеченные выше результаты позволяют опереться на следующие важнейшие факты [3, 5]:

— возможность поступательного и вращательного осциллирующих движений геоблоков в стесненных условиях напряженных массивов горных пород, а следовательно, обладания ими кинетической энергии;

— теория волн маятникового типа позволяет моделировать их вещественные носители — геоблоки соответствующего иерархического уровня — как соударяющиеся сосредоточенные нелинейно упруго взаимодействующие массы;

— наличие установленного энергетического критерия возникновения волн маятникового типа — неперенное условие перехода накопленной в массиве упругой энергии от сил горного давления в кинетическую энергию движения геоблоков — носителей маятниковых волн, и наоборот.

Понятие температуры — энергетическое в своей основе и интегральное по своей сути [6, 7] — широко используется для обобщенной оценки состояния как живых, так и неживых систем (для краткости и обобщенно — геомеханическая Система). Опираясь на динамическое поле градиентного поведения этого скалярного физического параметра, а также критериальное соотношение устойчивости существования сложной Системы в целом, можно проследить ее эволюцию от возникновения и до распада (в том числе в катастрофической форме).

Общий энергетический баланс такой Системы W_{Σ} состоит из суммы двух составляющих ее энергий. Положительная составляющая идет на кластеризацию составных структурных элементов возникающей и растущей Системы (W_{+}). Отрицательная составляющая — диссипативная часть энергии для сложившейся на данный период геомеханической Системы; она идет на обеспечение энергетического обмена с внешней средой обитания Системы. Обозначим эту составляющую как W_{-} .

Очевидно, что при временном интервале T_{+} , когда выполняется условие $W_{+} + W_{-} < W^{*}$ (критическая емкость энергосодержания), рассматриваемая Система находится на стадии возникновения и роста до максимально возможного размера. При временном интервале $\Delta T_{\pm}$, когда достигается условие $W_{+} + W_{-} \cong W^{*}$, для Системы это означает достижение стадии полной зрелости (максимальной по своим размерам). При условии $W_{+} + W_{-} \geq W^{*}$ Система переходит в деструктивную стадию развития T_{-} : своей деградации и распада. Следовательно, полный (основной) период ее существования составляет $T_{\Sigma} = T_{+} + \Delta T_{\pm} + T_{-}$.

Таким образом, если под такой Системой будем понимать область повышенной концентрации напряжений в массиве пород, то в рамках существования выделенных трех основных периодов жизни любой системы (T_{+} , $\Delta T_{\pm}$, T_{-}) можно описывать процесс возникновения и эволюции очаговых зон катастрофических событий в геомеханике и геофизике. Но это уже сугубо энергетический (балансовый!) подход не только в теоретическом описании катастрофических событий, но и в построении адекватных ему систем мониторинга, основанных на регистрации скоростных характеристик структурных элементов массивов горных пород в объеме очаговых зон формирующихся катастрофических событий. Для этого в настоящее время сложились все необходимые предпосылки в рамках развивающейся теории волн маятникового типа [1–4].

Остановимся на двух важнейших аспектах, позволяющих рассматривать современный этап развития нелинейной геомеханики как рубежный для создания геомеханической термодинамики, в рамках которой будут описываться катастрофические события как неживой, так и живой природы.

Первый аспект — наличие и практическая завершенность классической термодинамики, основанной на кинетической теории газов и молекулярном движении в твердых телах [6, 7]. По существу, уже имеются хорошо разработанные основы для геомеханической термодинамики, но с очевидными специфическими особенностями: необходимости установить адекватные соответствия между такими базовыми понятиями, как: геоблок (структурный элемент) — молекула; скорость движения молекулы — скорость движения геоблока; силовые взаимодействия между молекулами — нелинейно упругое взаимодействие между геоблоками и т. п.

Второй аспект — особого внимания требует к себе важный этап в развитии любых Систем, обозначенный как $\Delta T_{\pm}$. Для горных ударов и землетрясений он специфицируется как геомеханически квазирезонансный [3, 4]. В классической термодинамике такие состояния физических тел обычно связаны с фазовыми переходами. Поэтому, вводя индекс i — иерархического уровня рассматриваемой геомеханической Системы, прослеживаем вполне очевидную аналогию с классической термодинамикой.

Основные энергетические этапы полного деформационно-волнового цикла возникновения и эволюции геомеханической Системы в виде очаговых зон катастрофических событий (землетрясений, горных ударов) можно специфицировать по лабораторным и натурным данным о крупных динамических (до катастрофических) событиях в геологии, геофизике и геомеханике, но до сих пор концептуально достаточно слабо увязанных между собой, как T_+ , $\Delta T_{\pm}$, T_- .

К изучению геомеханических условий возникновения, эволюции, реализации и последствий очаговых зон концентрации напряжений и деформаций для землетрясений и горных ударов уже давно обращено пристальное внимание естествоиспытателей в науках о Земле [1]. Большой объем разнородной информации о феноменологических проявлениях и их количественных оценках, по данным инструментальных измерений различными методами, привел к пониманию того, что фундаментальные представления по физике и геомеханике очаговых зон катастрофических событий в природных и горнотехнических системах недропользования призваны определять не только стратегию безопасного развития базовых промышленных отраслей человеческой деятельности, но и обеспечивать сохранность среды обитания для многих поколений землян, со способностью предвидеть негативные последствия на дальнюю перспективу.

В силу нелинейности в изменении физико-механических свойств при нагружении геоматериалов по полному циклу [3, 4], а также ввиду визуально фиксируемых или инструментально измеряемых разнородных геомеханико-геофизических, геохимических, гидродинамических, газодинамических и иных параметров в натурных или лабораторных экспериментах нередко при описании выделенных трех основных энергетических этапов (T_+ , $\Delta T_{\pm}$, T_-) используется понятие стадийности формирования очаговых зон разрушения горных пород. Известны также многочисленные работы по построению механико-математических моделей для их описания с позиций разных теорий прочности твердых тел [8–10; и др.]. В свое время акад. Е. И. Шемякин обратил особое внимание на необходимость детальных исследований запредельной стадии деформирования геоматериалов в объемных неравнокомпонентных условиях их нагружения [11].

В этой связи, в дополнение к основным энергетическим этапам возникновения, формирования и реализации очагов динамических событий в массивах горных пород в поле напряжений и деформаций, необходимо добавить еще два — фоновых: для некоторого периода наблюдений T_o — до начала возникновения концентраторов напряжений и деформаций в будущем очаге, а также для некоторого периода T_* — после возвращения контролируемой области геомеханического влияния от произошедшего динамического события в близкое к исходному фоновому состоянию на период T_o . Речь идет об энергетических уровнях фоновых геомеханико-геодинамических состояний контролируемых областей породных массивов, поскольку необходимо учитывать стесненность условий формирования очаговых зон разрушения горных пород. Как определять эти фоновые энергетические состояния контролируемых объектов природных и горнотехнических систем — вопрос принципиальной важности. В перспективных исследованиях ему необходимо уделить особое внимание, но уже с позиций нелинейной геомеханической термодинамики на волнах маятникового типа [5].

Необходимость использования объемных моделей очагов концентрации напряжений и деформаций в теории природно-техногенных катастроф обусловлена рядом физических ограничений для напряженных массивов горных пород, которыми не следует пренебрегать без риска для последующих неверных прогнозов в науках о Земле. Среди них: иерархическое строение геовещества, а значит, “перезаселенность” любых геосред дефектами от нано- до макро-уровней — практически планетарных размеров [1, 3]; крайняя неоднородность и слабая изученность формы границ и механических характеристик многофазного вещества, заполняющего трещинные пространства между геоблоками, но определяющих нелинейные динамико-кинематические характеристики движений как структурных отдельностей, так и их кластеров во внешних изменяющихся геофизических полях от различных по размерам, энергии и удаленности источников внутри Земли или на ее поверхности. Данная задача также относится к классу обратных задач нелинейной геотомографии [4]: определение формы работающих структурных отдельностей, а также эффективных механических характеристик их межблокового динамического взаимодействия.

При выборе двух фоновых энергетических этапов (T_0 и T_*) для возникновения, формирования и реализации очаговых зон катастрофических событий необходимо учитывать следующие аспекты. В течение цикла (T_+ , $\Delta T_{\pm}$, T_-) концентрации и релаксации аккумулирующейся здесь упругой энергии могут происходить немонотонные во времени и пространстве изменения (вплоть до знакопеременного осциллирующего вида [3]) радиуса формирующегося очага r , $0 \leq r(t) \leq r_0$; r_0 — максимальное значение, определяющее излучаемую энергию W . С изменением $r(t)$ сопряжено изменение радиуса зон нелинейного влияния этого очага $R(t)$ [3, 4]. Будем считать справедливым ограничительное условие и на основном термодинамическом периоде T_{Σ} для отношения этих радиусов [3]:

$$\frac{R(t)}{r(t)} \leq 8-10 \text{ для } t \in [T_+, \Delta T_{\pm}, T_-], \quad (1)$$

$$0 \leq R(t) \leq R_0 \text{ (} R_0 \text{ соответствует } r_0 \text{)}.$$

Конкретный вид функционального выражения для отношения (1) во времени t непосредственно связан со скоростью процесса кластеризации структурных элементов формирующегося очага и определяется геомеханическим инвариантом $\mu_{\Delta}(\delta)$ по [4]. Этот вопрос требует отдельного изучения.

Соотношение (1) свидетельствует о том, что область концентрации упругой энергии в процессе ее релаксации на критической стадии $\Delta T_{\pm}$ деформирования очага разрушения (r_0) много больше по объему и включает дополнительно в себя как ближнюю, так и переходную окрестные зоны нелинейно-упругого деформирования массивов горных пород [3].

При этом для фоновых периодов T_0 и T_* существования геомеханической Системы для T_{Σ} необходимо учитывать глобальные геодинамические условия возникновения очаговых зон концентрации напряжений, в том числе и разрабатываемых месторождений полезных ископаемых. Такой геомеханико-геодинамический фон для конкретных регионов мира [3, 4] можно определять суммарно — в энергетическом параметре W , куда равноправно входят как упругий потенциал очаговой зоны U_0 , так и кинетическая энергия движения составляющих ее структурных элементов (геоблоков) W_k , которую можно рассчитать по данным деформационно-волнового мониторинга со специальными измерительными системами.

Как показано в [4], при медленно протекающих геотектонических процессах значения U_0 на заданных глубинах H от поверхности Земли определяются в основном гравитационным полем тектонических напряжений ($\mathcal{H}$), а W_k — интенсивностью техногенной деятельности либо влиянием удаленных крупных землетрясений и взрывов. Естественным следствием концептуальных представлений акад. М. А. Садовского о блочно-иерархическом строении массивов горных пород и планетарных тел [12, 13] является заключение о том, что “в блоковой среде напряжения в основном перераспределяются не по поверхностям плоскостей (трещин), а в объеме энергонасыщенной геосреды, т.е. в системе взаимодействующих между собой блоков” [14, 15]. Это легло в основу теории волн маятникового типа [3, 4], устанавливающей аналитические связи между динамико-кинематическими характеристиками механических колебательных движений геоблоков в условиях напряженных массивов горных пород и пространственно-временной структурой сопровождающих движения сейсмоэлектромагнитных эмиссионных полей [1].

За счет поступательных и вращательных движений геоблоков естественно ожидать, что они должны проявиться в результатах объемного пространственно-временного анализа изменения энергетической структуры эмиссионных полей по регистрируемой геомеханико-геофизической, геохимической или иной информации. Они локализованы, как правило, в нечетко выраженных зонах контакта δ_i структурных отдельностей Δ_i с формальной характеристикой в виде геомеханического инварианта $\mu_\Delta(\delta)$ [3, 4]. Их оконтуривающая мощность δ составляет обычно до 10 % от диаметров Δ взаимодействующих блоков определенного иерархического уровня, зависящего от размера, энергетических характеристик и удаленности источника динамического события (очаговая зона).

Подобного масштабного уровня геомеханико-геодинамические исследования, связанные с подвижностью геоблоков в формирующихся очаговых зонах деструктивных проявлений горного давления, следует проводить с применением методов спутниковой геодезии и линеamentного анализа. При этом необходимо будет ввести и аналитическое выражение для понятия “геомеханическая температура”.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ЛИНЕАМЕНТОВ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Среди структурно-геологических условий обработки месторождений полезных ископаемых одними из наиболее важных параметров являются тектонические разломы и трещиноватость горных пород. Ориентация в пространстве, частота, тип и виды трещин оказывают большое влияние на физико-механические свойства пород, определяющих устойчивость горных выработок, а также условия их обводнения, технологию разработки месторождений, организацию безопасного горнотехнического производства. Детальное изучение разномасштабной трещиноватости необходимо в расчетах, способствующих повышению безопасности и производительности труда не только отдельных предприятий, но и горнодобывающих районов в целом.

Данные дистанционного зондирования Земли применяются в геологическом картировании для выявления, изучения и отображения на структурно-тектонических картах блочно-иерархического строения земной коры. С появлением спутниковых изображений поверхности Земли и развитием аппаратуры, программного обеспечения по обработке данных дистанционного зондирования возможности геологического дешифрирования значительно расширились. При геологическом картировании дистанционные методы используются в комплексе с геоде-

зическими, геофизическими, геохимическими, структурно-геологическими и др. Это позволяет оперативно получать информацию о геологическом строении больших территорий, выделять ранее неизвестные объекты, устанавливать критерии поисков месторождения полезных ископаемых и т. д. На основе материалов дистанционного зондирования появились новые виды геомеханических и геологических исследований, оформились самостоятельные научные направления — космическая геология, линеаментная тектоника, изучение кольцевых структур [16].

Большие перспективы в плане геомеханико-геодинамических исследований методами спутниковой геодезии рассматриваются при изучении полного деформационного цикла: возникновения, локализации, формирования, реализации и последствий очаговых и окрестных зон нелинейного влияния от природно-техногенных катастрофических событий в регионах крупномасштабного недропользования с энергетических позиций по временным периодам $T_i (i \in 0, +, \pm, -, *)$ на конкретных горнодобывающих объектах Кузбасса. Здесь необходимо развивать методические возможности для определения по данным космической съемки не только иерархической структуры строения изучаемой геомеханической Системы, но и динамико-кинематических характеристик движения геоблоков в процессе подготовки и реализации катастрофических событий: для конструктивного применения формального аппарата нелинейной геомеханической термодинамики.

Линейные объекты дешифрирования на материалах ДЗЗ называются линеаментами. Этот термин ввел американский геолог В. Хоббс в начале XX в. для обозначения вытянутых в одном направлении форм рельефа (горных массивов, речных долин, морских берегов) и элементов геологической структуры, не всегда очевидно связанных с тектоническими разрывами и смещениями по ним. Со временем термин линеамент стал практически синонимом косвенного или непосредственного проявления глубинных разломов. С появлением космических снимков к ним возрос интерес с геомеханических позиций [1]. В настоящее время под линеаментами понимаются линейные или слабо дугообразные морфологические неоднородности земной коры и литосферы с разломами разного ранга, протяженности, глубины и возраста заложения, которые проявлены на поверхности Земли непосредственно (трещиноватые зоны, тектонические разломы) или опосредованно — геологическими и ландшафтными аномалиями [17].

Определение линеаментов на земной поверхности может выполняться двумя способами: визуальным или автоматизированным. Для выделения линейных структур визуальным способом традиционно используются морфологические карты и аэрокосмические снимки, полученные с помощью ДЗЗ. Этот процесс довольно трудоемкий и его невозможно применить на территориях с густой растительностью или с достаточно мощным чехлом рыхлых отложений [18]. В связи с этим количественному изучению линеаментов, обусловленных структурной нарушенностью горных пород, уделялось недостаточно внимания. Улучшение идентификации линейных структур происходит благодаря применению автоматизированного линеаментного анализа. Автоматизированное дешифрирование обладает высокой скоростью, экономической эффективностью, а также объективностью и возможностью сравнения с данными различных методов [19]. Обзорность космических изображений обеспечивает возможность выявления геоструктурных линеаментов, в том числе на территориях с растительным и осадочным покровом. Весьма актуальна разработка и практическая реализация технологии автоматизированного линеаментного анализа, позволяющей преодолеть ограничения, свойственные локальным методам контроля. С этой целью создан программный продукт для оценки тектонических линеаментов на основе данных дистанционного зондирования Земли.

О КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ ТРЕЩИНОВАТОСТИ/НАРУШЕННОСТИ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВЫХ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Метод дистанционного зондирования применяется для анализа геодинамической обстановки на сейсмоопасных территориях. Он связан с фиксацией процесса структурной изменчивости линеamentной сети на спутниковых изображениях. Возможность использования такого метода основана на том, что системы линеamentов в геодинамически активных регионах тесно связаны с системами сейсмогенных нарушений и реагируют на кинематические изменения межблоковых деформаций, обусловленных изменением поля напряжений земной коры [20]. Это направление фундаментальных исследований непосредственно относится к “пассивной” геотомографии на волнах маятникового типа [4].

Дистанционное исследование динамического деформирования земной поверхности существенно дополняет и облегчает процессы ведения маркшейдерских работ, которые включают в себя:

- мониторинг геомеханического поведения открытых горных выработок;
- контроль безопасности осуществления геологоразведочных работ;
- прогнозирование чрезвычайных ситуаций;
- определение мест локализации опасных зон.

Применение методов ДЗЗ для контроля состояния геосистем позволяет получать принципиально новую информацию о геологическом строении заданного района, оперативно оценивать структурные особенности геообъектов, осуществлять выбор наиболее перспективных площадей для крупномасштабного геологического картографирования, а также организации поисковых геофизических и буровых работ [21]. Дистанционные методы зондирования Земли перспективны для выявления закономерностей локализации в пространстве полезных ископаемых. На основе комплексной интерпретации данных ДЗЗ могут быть установлены критерии распределения залежей горючих и рудных полезных ископаемых, возможного их тектонофизического взаимного влияния [16]. Это в равной степени относится и к возможностям восстановления сложных по топологии сейсмоземиссионных волноводных структур.

Актуальность задачи прогноза и поисков полезных ископаемых с применением спутниковых дистанционных методов обусловлена необходимостью получения качественных данных как по новым, так и по ранее изученным геообъектам — без существенных затрат в сравнении с проведением дорогостоящих полевых экспедиционных работ. Данные дистанционного зондирования Земли охватывают большие территории, включая труднодоступные для традиционных методов районы. То же касается и геомеханико-геодинамического районирования больших территорий Сибири.

Использование данных ДЗЗ в современных условиях позволяет решать следующие задачи:

- прогнозирование мест локализации минерализованных зон;
- выявление минералогического качества природных аномалий для рудоконтролирующих и нефтегазовых структур;
- создание карт различной специализации (геологических, тектонических, геоморфологических, инженерно-геологических, эколого-геологических, прогнозных горно-геологических и др.);
- исследование геоструктурных и топологических форм литосферы;
- уточнение и детализация геологического строения отдельных участков поверхности Земли;
- мониторинг современных геомеханико-геодинамических процессов.

На основе аэрокосмической информации создаются инженерно-геологические карты и топографические планы в любом удобном масштабе. Эти данные используются при проведении геологических и маркшейдерских работ [22]. Благодаря своим разрешающим свойствам, космические снимки находят широкое применение в практической и научной сфере. Материалы исследований поверхности Земли из космоса можно использовать для мониторингового контроля возникновения и формирования очаговых зон катастрофических событий в науках о Земле. Космическую съемку применяют в исследованиях, направленных на всестороннее изучение природных ресурсов, динамики природных явлений, для контроля эволюции и решения задач охраны окружающей среды [23].

Дистанционные методы исследования природных объектов обеспечивают не только большую обзорность, но и возможность повторного получения данных через определенные промежутки времени, высокую скорость передачи изображений, а также возможность применения комплексного анализа для оценки динамики развития изучаемого природного/техногенного явления и геосистем на основе оперативного специализированного картографирования. Использование результатов спутниковой съемки для целей картографирования обусловливается ценными свойствами космических снимков:

- большой диапазон территориального охвата и высокая генерализованность изображений;
- возможность изучения основных, региональных и зональных структурных особенностей, а также поверхности планеты в целом;
- единовременность выполнения съемки обширных территорий, что позволяет изучать связь контролируемых компонентов ландшафта;
- возможность определять форму структурных отдельностей породных массивов и динамико-кинематические характеристики их геоблоков;
- регулярность съемки позволяет изучать динамику различных природных явлений — периодических (суточных, сезонных) и эпизодических (лесные пожары, извержения вулканов и т. д.), а также контролировать последствия горнодобывающей и сельскохозяйственной деятельности (посевные площади, созревание, уборка урожая, загрязнение суши и моря) [24].

Составленные по космическим снимкам карты отображают явления, которые в отсутствие таких снимков не могли бы быть закартографированы [25]. Основные преимущества применения данных ДЗЗ для составления карт: актуальность на момент исследования, высокая точность определения границ объектов, более высокий коэффициент объективности выделения объектов и отнесения их к определенному классу. Использование данных ДЗЗ позволяет сократить объем наземных исследований и сроки выполнения трудоемких экспериментальных работ. Отличительная особенность развиваемого подхода — использование радарных данных дает возможность анализировать состояние поверхности горного массива вне зависимости от погодных условий.

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ РОЗЫ-ДИАГРАММЫ

После дешифрирования линеаментной сети на спутниковых изображениях необходимо провести предметный анализ полученных данных. Эффективным методом проблемно-ориентированной интерпретации полей линеаментов является построение роз-диаграмм для идентифицированных линеаментов. По этому методу строятся розы-диаграммы распределения разломов/трещин по азимутам и/или углам падения. Данные по ним группируются по любым выбранным интервалам, например через 5, 15 или 30°. В одну группу относят трещины, азимуты или углы падения которых находятся в пределах заданного интервала. Определяется количество трещин в каждом интервале и процент от общего количества проведенных замеров, принимаемых за 100 %. Для изображения азимутов углов падения розу-диаграмму строят на полной круговой сетке; бывает достаточно одного квадранта [26, 27]. На основании диаграмм де-

дается заключение о количестве систем трещин, приводится характеристика каждой системы с указанием генетического типа, описывается общая нарушенность массива горных пород и делаются соответствующие выводы.

Существует ряд признаков динамики линеаментных систем, позволяющих в ряде случаев определить не только время начала землетрясения, но и место расположения сейсмогенерирующего разлома. В нашем случае — нелинейного волновода для маятниковых волн. Такими признаками являются статистические показатели, в том числе розы-диаграммы, построенные как для всей исследуемой площади, так и для ее локальных областей [28].

В [28] на примере землетрясений в Калифорнии, Иране, Перу и в других регионах установлено наличие предвестниковой закономерности в изменении роз-диаграмм линеаментов, выявляемых по космическим изображениям. Они хорошо коррелируют с энергетическими этапами T_i :

- за 1–3 мес до землетрясения начинаются изменения формы роз-диаграмм [$T_0 \rightarrow T_+$];
- максимальные изменения происходят за 20 дней до сейсмического события [$T_+ \rightarrow \Delta T_{\pm}$];
- максимальные изменения сохраняются 20 дней после сейсмического события [$\Delta T_{\pm} \rightarrow T_-$];
- в течение 1–3 мес розы-диаграммы постепенно обретают исходную форму [$T_- \rightarrow T_*$].

Использование сигнатуры направленности ($\rightarrow$) между смежными энергетическими этапами эволюции данной геомеханической Системы здесь отмечено особо: как характеристики временных периодов ее перехода в качественно новые состояния.

Существуют различные методы исследования напряженно-деформированного состояния горного массива, кардинально отличающиеся друг от друга. В настоящей статье использовались наиболее доступные данные ДЗЗ, включая радарные снимки, к которым последовательно применяются операции фильтрации, аффинные и геометрические преобразования. Для объективного анализа полученных полей линеаментов строятся розы-диаграммы и выполняется статистическая обработка результатов.

Роза-диаграмма визуализирует любой набор экспериментальных данных, состоящий из множества измерений линейных отрезков, с учетом их направления или ориентации. В разработанном авторами программном продукте роза-диаграмма представляет собой графическое изображение результатов распознавания линейных структур. Для построения розы-диаграммы на $1/2$ часть круга наносится градусная сетка от 0 до 180° и проводятся радиусы с интервалом между ними 30° . Все замеры объединяются в группы с интервалом 30° ($0-30$, $31-60^\circ$ и т. д.). Общее количество замеров в каком-либо интервале будет соответствовать длине данного радиуса. После построения всех радиусов на градусной сетке $0-180^\circ$ они отображаются на градусную сетку $180-360^\circ$ в соответствии $0-30^\circ = 180-210^\circ$, $31-60^\circ = 211-240^\circ$ [29]. На рис. 1 показан пример построения такой розы-диаграммы, которая реализуется средствами языка программирования Python.

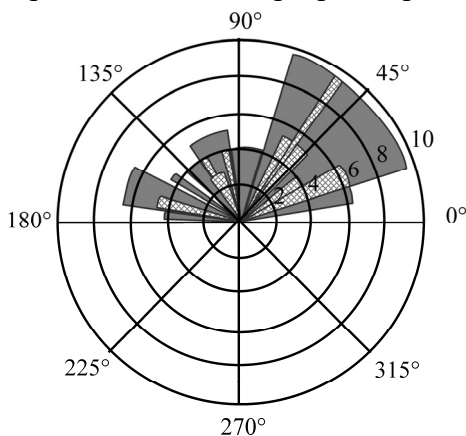


Рис. 1. Построение линеаментной розы-диаграммы

Для дополнительного анализа полей линеаментов, получаемых в расчетах, используется гистограмма, показывающая распределение суммарной длины отрезков по углам (рис. 2).

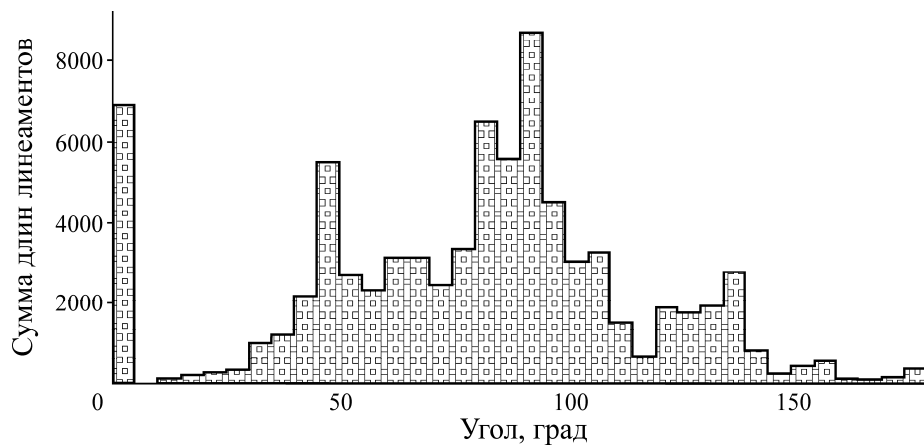


Рис. 2. Гистограмма для оценки распределения сумм длин линеаментов по углам

Таблица значений идентифицированных линеаментов содержит четыре поля: порядковый номер для подсчета линейных структур, координаты линейных структур, их длина и направление, измеряемое в градусах.

ДИАГРАММА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЛИНЕАМЕНТОВ

Диаграмма деятельности (рис. 3) представляет собой алгоритм для вычисления линеаментов. Она состоит из активностей, переходов, узлов принятия решений, ветвлений (соединений), начального и конечного состояния. Начальное состояние на диаграмме деятельности обозначается как закрашенный круг.

Активность служит для описания действий, которые необходимо пройти системе для получения результата, т.е. для перехода в конечное состояние. Отдельная активность обозначается на диаграмме прямоугольником с закругленными краями, внутри которого содержится ее краткое описание. Когда активность в некотором состоянии завершается, поток управления переходит в следующее состояние активности. Для описания этого потока используются *переходы*, показывающие путь из одного состояния в другое. На диаграмме такой переход изображается сплошной линией со стрелкой.

Узлы принятия решения используются для отображения расширений сценария на диаграмме деятельности. Они предназначены для определения правила ветвления и различных вариантов дальнейшего развития сценария. На диаграмме они обозначаются ромбом, рядом с которым содержатся условия ветвления и разные ответы. Существует три узла принятия решения. Это говорит о том, что 42.8% существующих активностей имеют различные варианты дальнейшего развития сценария. Все узлы имеют условия для перехода к следующему этапу, сформулированные в виде вопроса: “Допустимый результат?”. Если пользователь считает полученный результат допустимым для дальнейшего использования, то система переходит на следующий этап, если ответ — “нет”, то необходимо задать другие входные параметры для данной функции.

Ветвление обеспечивает разделение одного информационного потока на несколько параллельных:

- входит ровно один поток;
- выходят два и более потоков, каждый из которых далее выполняется параллельно с другими.

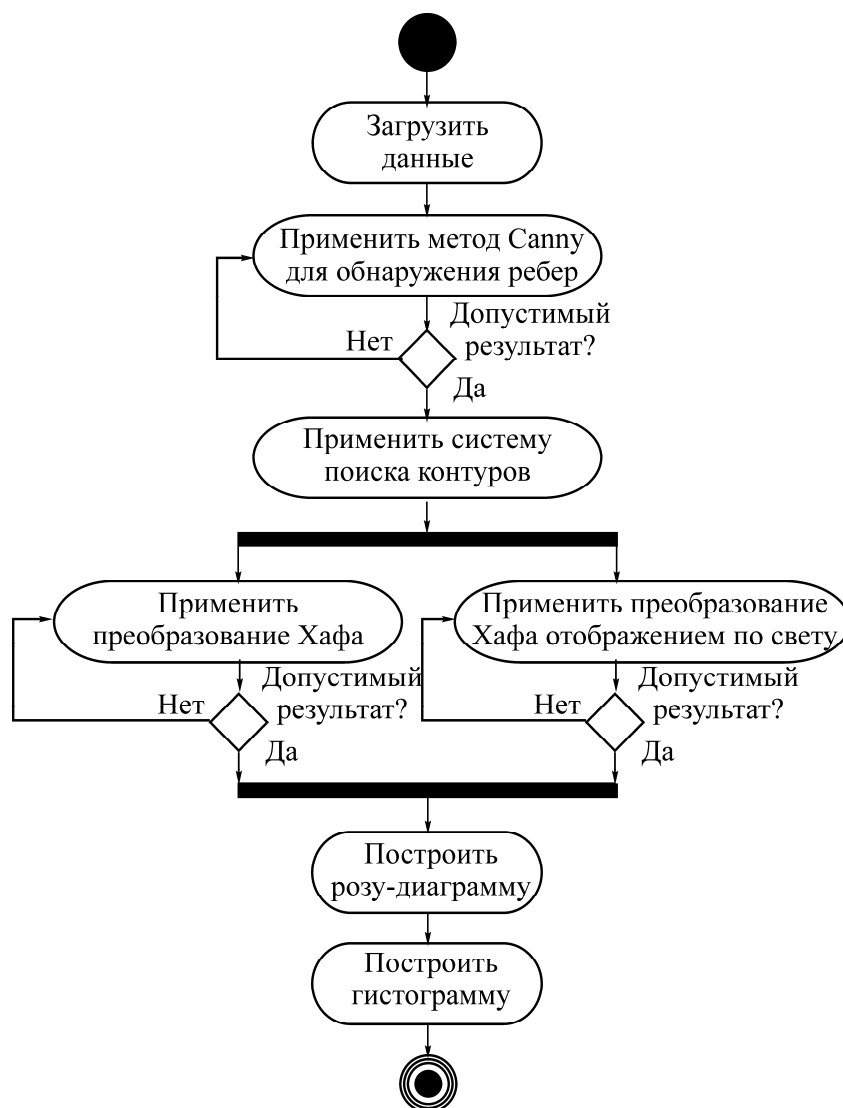


Рис. 3. Диаграмма деятельности для вычисления линеаментов

Соединение обеспечивает синхронизацию нескольких параллельных потоков:

- входят два или более потоков, причем они выполняются параллельно;
- выходит ровно один поток, в точке слияния входящие параллельные потоки синхронизируются, т.е. каждый из них ожидает, пока все остальные достигнут этой точки, после чего выполнение продолжается в рамках одного потока.

На диаграмме *ветвление* и *соединение* изображаются сплошной широкой закрашенной полосой. В нашем случае существует одно ветвление и одно соединение.

Конечное состояние на диаграмме деятельности обозначается как закрашенный круг с обранием.

ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА

Набор тестовых данных для автоматизированного линеаментного анализа представляет собой комплект из 14 радарных спутниковых изображений за 2019 г. для территории разреза Кийзасский Кемеровской области. Все изображения имеют тип GeoTiff, т. е. включают информацию о географической привязке и выполнены в градациях серого. В ночь с 5 на 6 июня

2019 г. на данном разрезе произошло катастрофическое событие: оползень на разрезе Кийзаский снес несколько опор линий электропередач, завалил лес и реку Кийзас на протяжении 800 м. В результате русло реки оказалось заваленным и потребовалась перекачка воды. Человеческих жертв не было. В табл. 1 представлены данные для тестирования.

ТАБЛИЦА 1. Комплект исходных данных (радарных изображений)

№ п/п	Имя изображения	Размер изображения, пиксель
1	06-01-2019_cut_pwr_ql.tif	625 × 501
2	11-02-2019_cut_pwr_ql.tif	625 × 501
3	19-03-2019_cut_pwr_ql.tif	625 × 501
4	12-04-2019_cut_pwr_ql.tif	625 × 501
5	06-05-2019_cut_pwr_ql.tif	625 × 501
6	30-05-2019_cut_pwr_ql.tif	625 × 501
7	11-06-2019_cut_pwr_ql.tif	625 × 501
8	23-06-2019_cut_pwr_ql.tif	625 × 501
9	29-07-2019_cut_pwr_ql.tif	625 × 501
10	22-08-2019_cut_pwr_ql.tif	625 × 501
11	15-09-2019_cut_pwr_ql.tif	625 × 501
12	09-10-2019_cut_pwr_ql.tif	625 × 501
13	14-11-2019_cut_pwr_ql.tif	625 × 501
14	20-12-2019_cut_pwr_ql.tif	625 × 501

В табл. 1 приведены радарные данные за 2019 г.: по одному изображению на каждый месяц. Исключение составляют май и июнь, так как они представляют особый интерес с позиций описания произошедшего катастрофического события. На каждый из этих месяцев приходится по два изображения, чтобы более точно проанализировать изменение роз-диаграмм и количество линеаментов в период развития оползня.

Расчеты поля линеаментов по исходным данным. Изображения тестировались с использованием одинаковых параметров. Результаты тестирования представлены на рис. 4–7. Для первого изображения показан полный цикл реализации разработанного алгоритма для демонстрации интерфейса программного продукта, для остальных изображений — только результаты. В качестве примера рассмотрим из таблицы изображение 06-01-2019_cut_pwr_ql.tif.

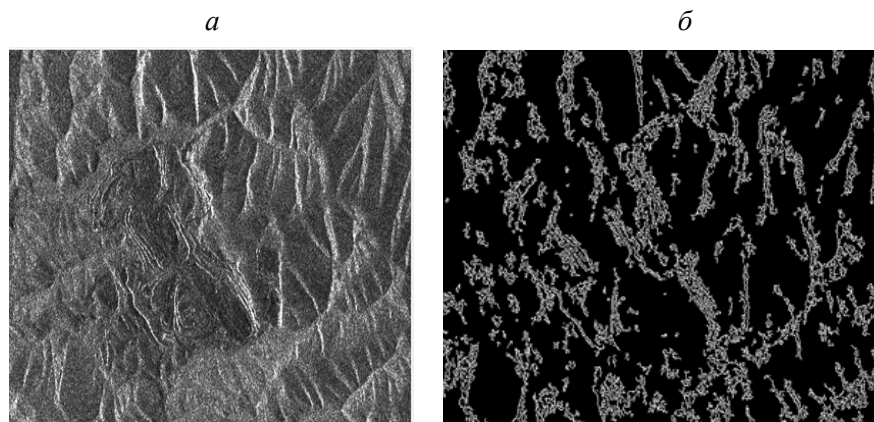


Рис. 4. Входное изображение элемента поверхности на основе радарных данных (а) и результат применения алгоритма Canny для обнаружения ребер (б)

Для использования алгоритма обнаружения ребер Санны задаем входные параметры функции: порог минимума и порог максимума. Это значения 150 и 600 соответственно, которые определены при предварительной обработке серии снимков.

Последовательно применяем к предыдущему результату алгоритм поиска контуров (рис. 5а). Входных параметров эта функция не имеет. На следующем этапе для применения преобразования Хафа задаем входные параметры функции: минимальная длина линии, максимально допустимый разрыв между отрезками. В нашем случае экспериментально подобраны и приняты значения 10 и 5 соответственно. Результаты расчета приведены на рис. 5б.

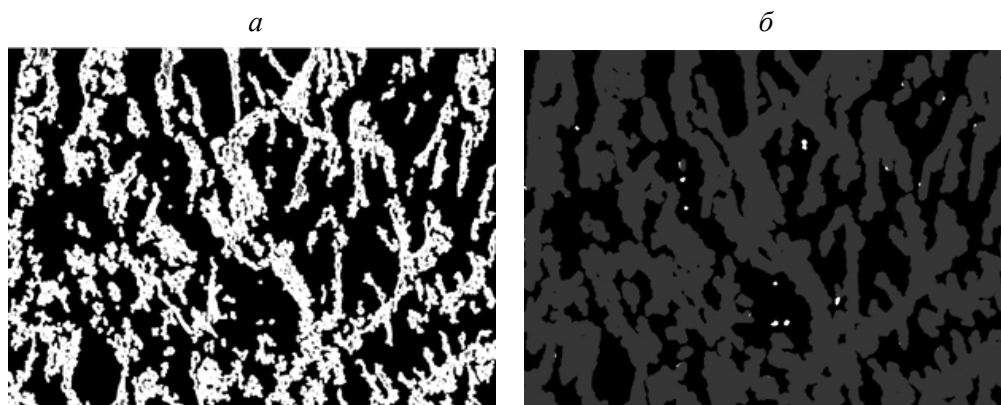


Рис. 5. Результаты поиска контуров (а) и преобразования Хафа (б)

Повторно преобразование Хафа применяется для отрисовки на изображении найденных линий разными цветами в зависимости от их длины:

- синий — если длина линеамента больше 100;
- розовый — если длина линеамента больше 30 и меньше или равна 100;
- желтый — если длина линеамента меньше или равна 30.

В перспективе будет достаточно просто перейти к канонической шкале иерархических представлений длины трещин/разломов и их линеamentных проявлений [3].

Далее представляем полученные результаты в виде розы-диаграммы (рис. 6), а также гистограммы (рис. 7) угловых распределений для выделенных линеamentных структур, одновременно формируя итоговую таблицу.

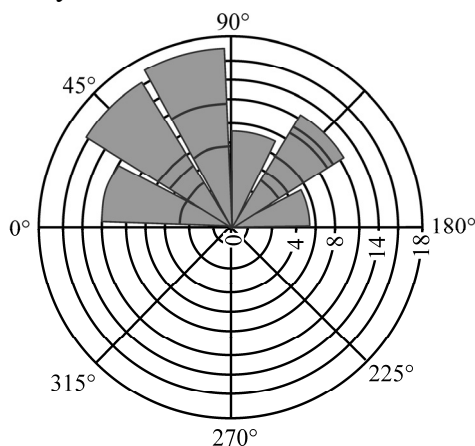


Рис. 6. Роза-диаграмма для разреза Кийзасский

Все данные помещаются для сохранения в созданную папку, которая содержит следующие данные:

- ссылка на интерактивный график розы-диаграммы;
- обрабатываемое изображение;
- точные углы найденных линейментов;
- преобразованные углы найденных линейментов для построения розы-диаграммы;
- результирующее изображение по методу Canny;
- результирующее изображение метода поиска контуров;
- таблица значений идентифицированных линейментов;
- длины найденных линейментов;
- таблица для построения гистограмм, которая содержит точные углы и длины найденных линейментов;
- таблица для построения розы-диаграммы, которая содержит преобразованные углы и длины найденных линейментов;
- статистическое изображение гистограммы;
- результирующее изображение по методу Хафа;
- результирующее изображение по методу Хафа с отрисовкой найденных линий разными цветами в зависимости от длины;
- статистическое изображение розы-диаграммы.

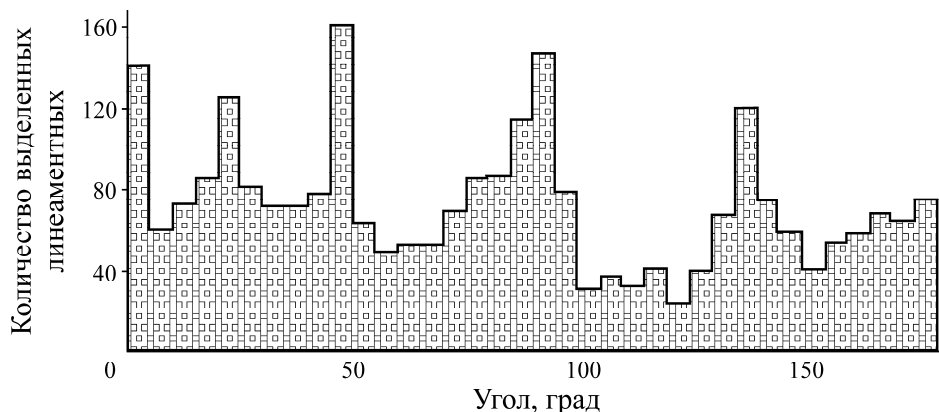


Рис. 7. Гистограмма распределений количества выделенных линейментных структур по углам

АНАЛИЗ РОЗ-ДИАГРАММ

Таким же образом получены и другие розы-диаграммы, которые проанализированы для определения зависимости между произошедшим оползнем и структурно-морфологическим состоянием земной поверхности. На рис. 8 представлены розы-диаграммы за 06.05.2019, 30.05.2019, 11.06.2019 и 23.06.2019 соответственно. Поскольку оползень произошел в ночь с 5 на 6 июня, то максимальное изменение роз-диаграмм должно было наблюдаться в период с 30.05.2019 по 11.06.2019 г.

Анализ полученных результатов показал, что с 06.01.2019 по 12.04.2019 розы-диаграммы близки по структуре и значительных изменений в них не наблюдается. Это свидетельствует об неизменности геомеханического состояния изучаемого горного массива. Однако с 06.05.2019 фиксируется заметное изменение формы розы-диаграммы, 30.05.2019 получена последняя диаграмма до начала катастрофического оползня на разрезе Кийзасский. На данный период времени ее форма значительно изменилась, а значит, изменилось и геомеханическое состояние горного массива. Последнее можно использовать как предвестник формирующегося оползня, тех-

ногенного землетрясения или другого катастрофического события. 11.06.2019 получена первая роза-диаграмма после оползневого обрушения. Ее форма в значительной степени отличается от предыдущей диаграммы, она как бы раскрылась. Динамическое событие уже произошло. Далее происходит постепенное установление новой формы розы-диаграммы, которая остается практически неизменной до нового предвестника землетрясений.

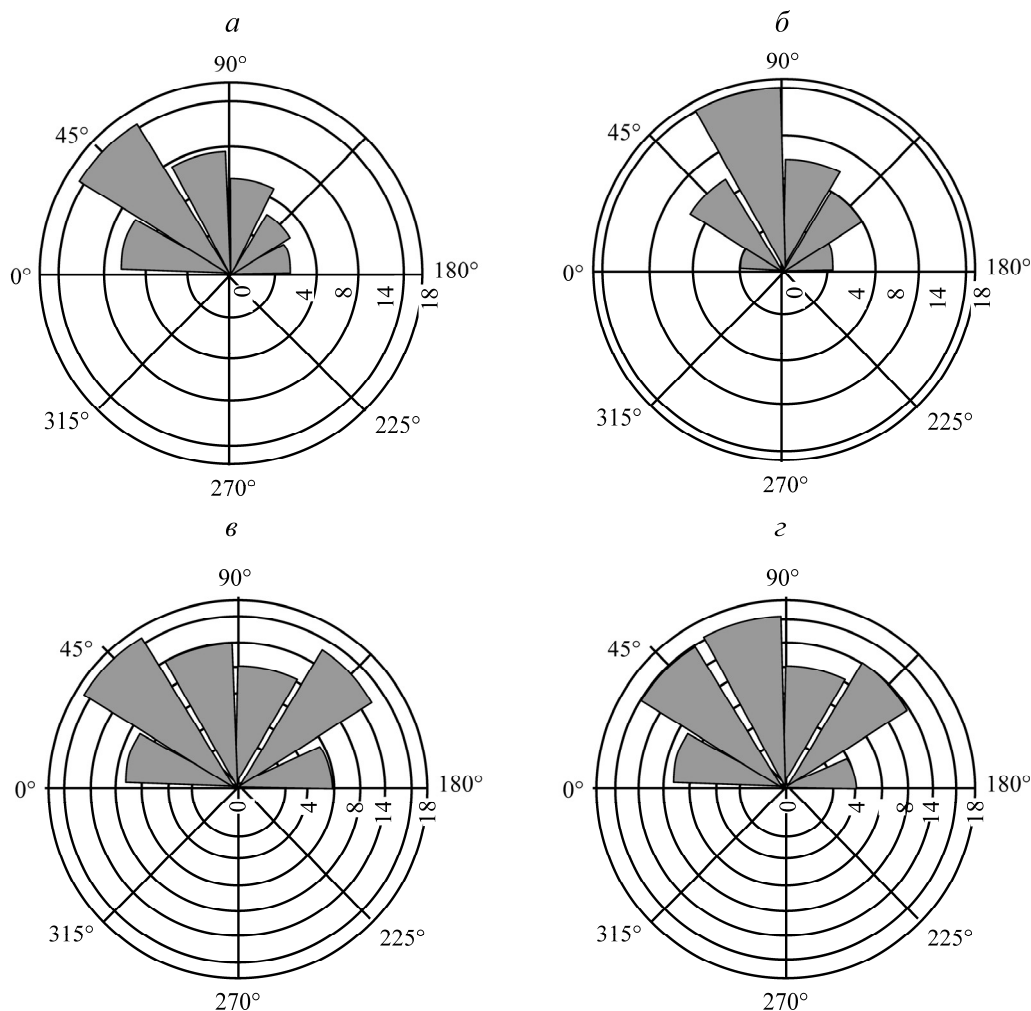


Рис. 8. Розы-гистограммы на период времени: 06.05.2019 (а); 30.05.2019 (б); 11.06.2019 (в); 23.06.2019 (г)

Таким образом, первое существенное изменение формы розы-диаграммы наблюдается за месяц до катастрофического события, при этом ее изменение происходит достаточно плавно. Быстрое изменение приходится на время развития крупного сейсмического события. После этого роза-диаграмма постепенно приобретает новую устойчивую форму.

Проанализируем далее зависимость между количеством линеаментов и изменениями в морфологической структуре земной поверхности. На рис. 9 приведены зависимости количества линеаментов от даты используемой спутниковой съемки. Можно сделать вывод, что начальное количество линеаментов примерно равно 3200. С 19.03.2019 их количество начинает уменьшаться вплоть до момента проявления самого оползня. Далее этот показатель резко увеличивается, и только к 14.11.2019 их количество становится практически прежним. Следовательно, количество выявленных линеаментов является важным критериальным мониторинговым

показателем. Он может применяться в качестве предвестника крупных деструктивных и сейсмических событий, но уже с позиций описания процессов структурной кластеризации и дезинтеграции очаговых зон катастрофических событий.

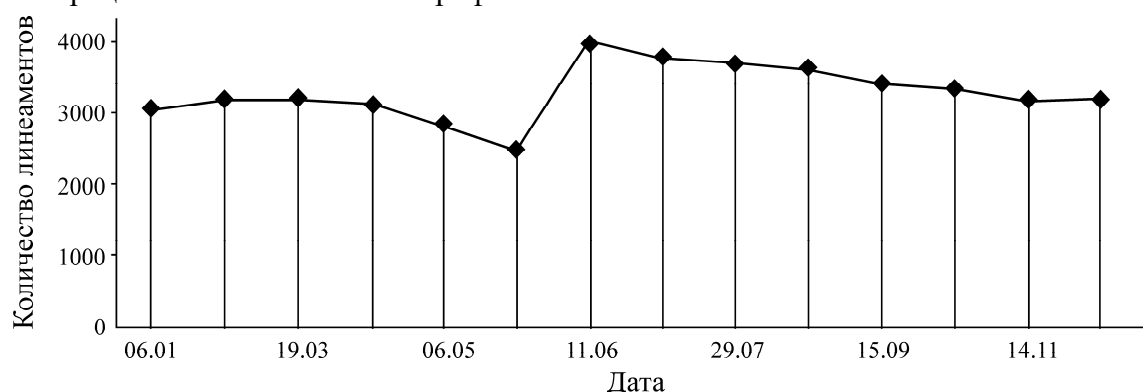


Рис. 9. Изменение количества линейментов в течение временных интервалов спутниковой съемки поверхности Земли в районе катастрофического оползня за период с 06.01.2019 г. по 20.12.2019 г. (разрез Кийзасский, Кузбасс)

ВЫВОДЫ

Созданный программный продукт пригоден для автоматизированного обнаружения и определения количества линейментных структур по спутниковым данным дистанционного зондирования Земли. Тестирование разработанной методики автоматизированного линейментного анализа позволило выявить линейные структуры разных иерархических уровней по космоснимкам. Это существенно повышает объективность и полноту анализа при спецификации геодинамической обстановки на исследуемой территории, связанной с проявлением и изменением трещиноватости горных пород, обусловленных происходящими природно-техногенными деструктивными процессами.

Результаты линейментного анализа представлены в виде роз-диаграмм, гистограмм и таблиц значений идентифицированных линейных структур с разными значимыми геомеханико-геоморфологическими параметрами. Экспериментальные данные автоматически экспортируются со всех этапов выполнения программы. Программный продукт протестирован для территории угольного разреза Кийзасский Кемеровской области, где произошло катастрофическое событие в виде большого оползня. Для соответствующей окрестной территории проанализированы изменения роз-диаграмм и количество линейментов в период формирования и реализации оползня.

Выявлены неизвестные ранее закономерности в трансформации формы роз-диаграмм до катастрофического события и после него, коррелирующие с термодинамическими периодами $T_i (i \in \mathbb{O}, +, \pm, -, *)$ состояния геомеханической Системы для очаговых зон катастрофических событий. Их эволюция свидетельствует о значительных изменениях в геоморфологической структуре данного участка земной коры, приводящих к разрушительным природно-техногенным явлениям. Первое существенное изменение формы розы-диаграммы наблюдается за месяц до катастрофического события. Аномально быстрое изменение розы-диаграммы приходится на период катастрофического события. Далее роза-диаграмма контролируемого участка постепенно приобретает качественно новую форму. Установлено, что количество выявленных линейментов — важный критериальный параметр, который может быть использован как в качестве диагностического, так и предвестника структурно-геоморфологических и сейсмических природно-техногенных катастрофических событий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Геомеханические поля** и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горно-технических и природных системах / В. Н. Опарин, В. В. Адушкин, А. А. Барях и др.; под ред. Н. Н. Мельникова. — Новосибирск: Изд-во СО РАН. — 2018. — Т. 1. — 549 с.; 2019. — Т. 2. — 543 с.
2. **Опарин В. Н., Потапов В. П., Киряева Т. А., Юшкин В. Ф.** К проблеме разработки методов и геоинформационных средств комплексной оценки влияния нелинейных деформационно-волновых процессов, индуцированных сейсмическими воздействиями, на геомеханическое состояние бортов карьеров и газодинамическую активность угольных шахт Кузбасса // ГИАБ. — 2020. — № 8. — С. 5–39.
3. **Adushkin V. V. and Oparin V. N.** From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed media, J. Min. Sci., Part I: 2012, Vol. 48, No. 2. — P. 203–222; Part II: 2013, Vol. 49, No. 2. — P. 175–209; Part III: 2014, Vol. 50, No. 4. — P. 623–645; Part IV: 2016, Vol. 52, No. 1. — P. 1–35.
4. **Опарин В. Н., Адушкин В. В., Востриков В. Ф., Юшкин В. Ф., Киряева Т. А. и др.** Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии // ГИАБ. — Ч. I: Формулировка и обоснование задачи исследований. — 2019. — №1. — С. 5–25; Ч. II: динамико-кинематические характеристики волн маятникового типа в напряженных геосредах и сейсмоземиссионные процессы. — 2019. — № 11. — С. 5–26; Ч. III: Перспективные системы контроля деформационно-волновых процессов в подземных и наземных условиях ведения горных работ. — 2019. — № 12. — С. 5–29.
5. **Опарин В. Н.** Волны маятникового типа и “геомеханическая температура” / Тр. 2-й Рос.-Кит. Междунар. конф. “Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах”. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. — С. 169–172.
6. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. — М.: Мир, 1976. — Т. 3, 4. — 496 с.
7. **Левич В. Г., Вдовин Ю. А., Мямлин В. А.** Курс теоретической физики. Т. II. — М.: Наука, 1971. — 936 с.
8. **Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г.** Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. — М.: Недра, 1985. — 271 с.
9. **Гузов М. А., Макаров В. В.** Деформирование и разрушение сильно сжатых горных пород вокруг выработок / отв. ред. В. Н. Опарин. — Владивосток: Дальнаука, 2007. — 232 с.
10. **Аннин Б. Д., Жигалкин В. М.** Поведение материалов в условиях сложного нагружения. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. — 342 с.
11. **Шемякин Е. И., Фисенко Г. Л., Курленя М. В., Опарин В. Н. и др.** Эффект зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок // ДАН. — 1986. — Т. 289. — № 5. — С. 1088–1094.
12. **Садовский М. А., Кочарян Г. Г., Родионов В. Н.** О механике блочного горного массива // ДАН. — 1988. — Т. 302. — № 2. — С. 306–307.
13. **Садовский М. А.** Иерархия от пылинок до планет // Земля и Вселенная. — 1984. — № 6. — С. 5–9.
14. **Быков В. Г.** Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. — 2005. — Т. 46. — № 11. — С. 1176–1190.
15. **Викулин А. В.** Физика волнового сейсмического процесса. — Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2003. — 151 с.
16. **Михайлов А. Е., Корчуганова Н. И., Баранов Ю. Б.** Дистанционные методы в геологии. — М.: Недра, 1993. — 243 с.

17. Корчуганов Н. И., Корсаков А. К. Дистанционные методы геологического картирования. — М.: КДУ, 2009. — 158 с.
18. Донов В. В. Разработка методики многоуровневого линеаментного анализа аэрокосмических изображений. — М., 2009. — 120 с.
19. Полетаев А. И. Линеаментный анализ — один из основных дистанционных методов геоэкологического дешифрирования // Экология и науки о Земле. — Дубна, 2006. — 232 с.
20. Колобова Н. С. Методики и технологии дистанционного зондирования Земли с целью оценки параметров тектонических процессов. — М., 2010. — 156 с.
21. Златопольский А. А. Мультимасштабный анализ ориентации текстуры поверхности Земли. Особые масштабы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — М.: 2012. — 134 с.
22. Златопольский А. А., Малкин Б. В. Автоматизированный анализ ориентированных характеристик данных дистанционного зондирования. — М., 2012. — 156 с.
23. Кадыров Р. И., Нугманов И. И., Чернова И. Ю. Автоматизированный линеаментный анализ. — Казань, 2012. — 38 с.
24. Судариков В. Н., Калинина О. Н. Основы аэрокосмофотосъемки. — Оренбург, 2017. — 191 с.
25. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. — М., 2010. — 560 с.
26. Sven Tiren. Lineament interpretation, Short Review and Methodology, 2010. — 38 с.
27. Еремеев В. В. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли. — М., 2018. — 64 с.
28. M. Seal and Michael J. Summon. Practical algorithms for image analysis, 2000. — 400 p.
29. Matlab documentation. [Электронный ресурс] // https://www.mathworks.com/?s_tid=gn_logo. (Дата обращения: 10.03.2019).

*Поступила в редакцию 26/IV 2022
После доработки 05/V 2022
Принята к публикации 06/V 2022*