

ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

УДК 622.06

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕКУЩИХ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ
В ЗАКЛАДОЧНОМ ПРОЦЕССЕ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

О.С. БРЮХОВЕЦКИЙ, С.В. ИЛЯХИН

*ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: bos.rggru@mail.ru, isv11@mail.ru*

Установлено, что в зависимости от величины концентрации тиксотропной смеси, содержания и свойств минерального вещества тонких классов, закладочная смесь на основе текущих хвостов может быть представлена средой со слабо или сильно выраженными вязкопластичными свойствами. С повышением доли содержания тонких классов, что характерно для текущих хвостов, сопротивления движению смесей в трубах резко усиливаются. Для снижения затрат энергии и повышения надежности гидротранспортирования от закупорок в высокоплотные закладочные смеси требуется вводить специальные добавки, разрушающие коагуляционные структуры. При этом сопротивления снижаются в несколько раз. Использование тиксотропных свойств закладочных смесей делает возможным получение закладки, обладающей высокими прочностями и упругими характеристиками при наиболее полном использовании активности вяжущего компонента. Кроме того, тиксотропные смеси обладают необходимой для трубопроводного транспорта подвижностью при значительном (до 2—3 раз) снижении расхода воды. Расход вяжущего компонента при этом уменьшается на 20—22%. Один из радикальных способов утилизации тонкодисперсных хвостов достигается при использовании не только в закладочном процессе, но и для различных хозяйственных нужд.

Ключевые слова: закладочный процесс; отвальные хвосты; текущие хвосты обогащения; твердеющие смеси; пористость; концентрация и крупность твердеющего компонента; вязкопластичные свойства; водоудерживающий показатель; коагуляционные структуры; тиксотропные свойства.

DOI:10.32454/0016-7762-2018-6-66-76

EXPEDIENCY OF THE USING OF THE CURRENT TAILINGS
IN THE STOWAGE PROCESS OF MINING ENTERPRISES

O.S. BRYUHOVECKIJ, S.V. ILYAHIN

*Russian State Geological Prospecting University
23, Miklouho-Maklay's street, Moscow 117997, Russia
email: bos.rggru@mail.ru, isv11@mail.ru*

It has been discovered, that depending on the concentration of the thixotropic mixture, the content and properties of the mineral substance of thin classes, the filling mixture based on the current tailings can be represented by a medium with weakly or strongly expressed viscoplastic properties. With an increase of the content of thin classes, which is typical for the current tailings, the resistance to movement of mixtures in pipes sharply increases. To reduce energy costs and improve the reliability of hydrotransportation from blockages, special additives are required to be add

into the high-density filling mixtures, which destroy coagulation structures. In this case, the resistance is reduced several times. The use of the thixotropic properties of the filling mixtures makes it possible to obtain a stowage with high strengths and elastic characteristics with the most complete use of the activity of the astringent agents (binding component). In addition, thixotropic mixtures possess mobility necessary for pipeline transport with a significant (up to 2–3 times) decrease in water consumption. The consumption of the astringent agent is reduced by 20–22%. One of the radical ways to dispose of the fine tailings is achieved by using them not only in the filling (stowing) processes, but also for various household needs.

Keywords: filling (stowing) process; dump tailings; current tailings of enrichment; hardening mixtures; porosity; concentration and size of the hardening component; viscoplastic properties; water binding indicator; coagulation structures; thixotropic properties.

Известное требование ресурсосбережения при обострении экологической обстановки в регионах с действующими горно-металлургическими и топливно-энергетическими предприятиями обращает внимание специалистов к проблеме утилизации хвостов. Наибольшие трудности в её решении возникают для текущих хвостов руд, особенно с учётом нужды собственного горного производства по хвостохранилищам.

Рудные хвосты широко используют в качестве сырьевого источника закладочных материалов в виде так называемых отвалных хвостов. Повышенная ценность их заметно повлияла на масштабы использования таких хвостов, которые заменяют промпродуктами вторичной их переработки, т. е. текущими хвостами.

Переход на стадийную флотацию руд цветных металлов, повышающаяся ценность техногенных образований в хвостохранилищах, подлежащих вторичной переработке, вносят существенные изменения в качество этого источника закладочных материалов, особенно для способов закладки с твердеющими добавками.

Научными исследованиями [4] подготовлен определённый задел для отработки ряда технологических приёмов использования текущих хвостов, позволяющих существенно снизить ресурсозатратный фактор в горно-обогательном цикле металлургического производства и получить природо-охранный эффект, учитывающий возможности консервации хвостов в подземных выработках. Рассмотрим некоторые проблемные вопросы в данной области.

По дисперсному составу текущие хвосты современных процессов флотации можно характеризовать как содержащие частицы класса -74 мк до 70–80 %, а часто и 95 %.

Содержание твёрдого компонента в гидросмеси по весу составляет 25–35%, при этом содержание класса частиц крупностью -40 мкм достигает 60%. Требуется предварительная подготовка таких хвостов: сгущение, обезвоживание и нейтрализация тонких классов в связи с требованиями повышенной водоотдачи и недопущения сегрегации цемента, например, при гидравлической твердеющей закладке. Закладочные смеси по условиям использования цемента и недопущения обводнения выработок должны иметь минимум содержания воды.

По вещественному составу твёрдой фазы хвосты могут быть в виде осадочных, метаморфизованных или кристаллических разностей минералов, частицы которых в разной степени обладают гидрофильными или гидрофобными свойствами.

Характерно, что классы в таких смесях при разных, но всегда высоких концентрациях, вызывают появления в хвостах реологических свойств.

С учётом особенностей вещественного состава твёрдой фазы основной вклад в появление реологических свойств вносят тонкие классы частиц крупностью меньше 20–40 мкм. В то же время опыт показывает [2, 3], что при ограничении их содержания в смеси, например, меньше 30% влияние на появление реологических свойств в гидросмеси ослабевает.

Поэтому в практике закладочных работ при использовании любых хвостов всегда вводится ограничение на содержание тонких классов. С этой целью при классификации выделяют большую часть шламов. На отдельных горных предприятиях применяют для этого не только одно- и двухстадийную, но даже трехстадийную классификацию при одновременном доизвлечении полезного компонента. Содержание тонких классов доводится обычно до 15–25%.

Заметим, что среди специалистов распространено мнение о благоприятном влиянии тонких классов грунтов и измельченных пород на закладочный процесс, что следует из оценки опыта использования хвостов со значительным (десятки %) содержанием карбонатных пород (обычно СаО) [1].

Анализ практики гидрозакладочных работ, в том числе с твердеющими смесями на основе классифицированных хвостов показал, что общую оценку их пригодности по крупности можно дать на основе соотношения [4]:

$$A = 125 \sqrt{\frac{d_r}{d_m}}, \%,$$

где A — граничное содержание класса заполнителя меньше d_r ; d_r — граничный размер фракции материала, требующий регулирования по содержанию, мм; d_m — максимальный граничный размер класса с содержанием не превышающим 5–10%.

Величина d_r по различным данным зависит от вещественного состава материала и ряда физи-

ко-механических свойств вмещающей его среды, принимается равной 0,02—0,025 мм, а в отдельных случаях и больше (0,04). Обычно в хвостах максимальный граничный размер можно принять около 0,5 мм. Тогда содержание класса меньше 0,02—0,025 мм, согласно формуле, не должно быть больше 25%, что и соответствует общепринятому стандарту.

В связи со стремлением интенсифицировать закладочный процесс особо выделяется проблема дренажа воды из массивов с хвостами, доставляемыми в виде обычных и твердеющих смесей. Надлежащее техническое решение дренажа заметно влияет на технологию, а достигнуть его можно лишь подбором фракционного состава хвостов или разумным использованием флокулянтов, даже при работе на классифицированных хвостах.

Качество дренажа определяется пористостью закладочного массива. Экспериментальные материалы для различных песков и хвостов показывают, что значения величины пористости в массиве находятся в пределах $0,35 \leq \varepsilon \leq 0,44$ [2].

Поскольку при намыве массива происходит естественное расслоение смеси, то значения пористости оказываются разными в различных его зонах, что вызывает так называемую нестационарную фильтрацию воды. Практически редко допускается скорость фильтрации в подземных условиях меньше 1—3 см/ч. Для получения достаточно короткого цикла закладки стремятся иметь скорости фильтрации, равные 10 см/ч и более.

На фильтрационный режим существенное влияние оказывают концентрации смеси, пористость возведенного массива и площадь фильтрации. Причём между скоростью и площадью фильтрации существует обратная зависимость. Она подтверждает характерные для практики наблюдения, например, в больших по объёму полостях (при площадях фильтрации в несколько сотен и тысяч квадратных метров) допустима относительно небольшая скорость фильтрации — порядка нескольких сантиметров в час. Поэтому следует стремиться к поддержанию возможно более высокой плотности смеси и учитывать особенности условий фильтрации.

Добавление небольшого количества цемента или другого вяжущего компонента не изменяет существенным образом пористости сыпучего заполнителя, однако, как и наличие тонких классов (обычно с содержанием фракции < 0,04 мм — 60%), присутствие цемента может активизировать образование коагуляционных структур. Особенность взаимодействия цемента с водой состоит в том, что при её избытке происходит одновременно сегрегация цемента, которая снижает эффективность его использования.

Другим фактором, определяющим целесообразность использования текущих хвостов в закладочном процессе, является их поведение в массиве.

Анализ обширных опытных данных по использованию даже классифицированных хвостов в ка-

честве закладочных материалов свидетельствуют, что при концентрациях твёрдого компонента 0,65—0,7, вследствие водоудерживающего эффекта, приемлемая прочность массива (0,7—1,8 МПа) достигается при расходе цемента 12—14% по весу от твёрдой массы, в то время как при концентрациях 0,8—0,85 эти значения получают при 4—6% (в возрасте 28 дней).

Поэтому особый интерес вызывает использование в качестве основного компонента закладочной смеси текущих хвостов, сгущенных до 20% содержания воды.

Здесь уместно остановиться на разработанной нами технологии закладочных работ на основе тиксотропных смесей [5].

Научной основой новой технологии послужило понимание процессов взаимодействия частиц заполнителя, вяжущего и воды с точки зрения физико-химической механики дисперсных систем. Закладочная смесь является типичной дисперсной системой. Твёрдый скелет в смеси образован агрегатами заполнителя, промежутки между которыми заполнены раствором вяжущего компонента, в целом такую смесь можно считать гелем. В очень хорошей по качеству смеси раствор заполняет все промежутки в скелете из агрегатов, в связи с чем образуется единая твердая структура по всему объёму закладки. С точки зрения реологии закладочная смесь может рассматриваться как непрерывная среда в пределах всего объёма. В то же время закладочную смесь можно рассматривать и как коагуляционную структуру, возникающую под действием молекулярных вандерваальсовских сил сцепления частиц, взвешенных в жидкой среде суспензии. Такие структуры в сравнении с кристаллизационными обладают малой прочностью, пониженной остаточными тонкими прослойками жидкой среды в местах контакта между сцепляющимися твёрдыми частицами. Вместе с тем коагуляционные структуры обладают тиксотропными свойствами, т. е. способны к обратимому восстановлению. Это обратимое превращение происходит под влиянием механических воздействий и обуславливается нарушением структурных связей закладочных смесей. При наложении механических воздействий система «разжижается», и тем сильнее, чем значительнее деформируется при этом коагуляционная структура. При этом огромное число частиц закладочной смеси приходит в интенсивное броуновское движение и вместо традиционного механического перемешивания инертного материала с цементом происходит физико-химическое распределение частиц вяжущего в закладочной смеси, подобно ионам соли в растворе. Кроме того, при соударении частиц цемента с их поверхности удаляются продукты диспергирования и перекристаллизации, обнажая при этом все новые поверхности для взаимодействия с водой, что способствует образованию кристаллической структуры искус-

ственного массива и более полной гидратации цемента.

Такое обратимое разрушение структуры с переходом в текучее состояние при механических воздействиях и самопроизвольное восстановление структуры в покое называется тиксотропией. Закладочная смесь как коагуляционная система характеризуется рядом физико-механических свойств. Её формирование начинается сразу же после затворения закладочного материала водой и продолжается в течение определенного времени, в пределах которого подготавливается переход закладочных смесей (упруго-пластичной вязкой системы) в твёрдое кристаллическое тело. Количество воды, при котором формируется связанная коагуляционная структура закладочной смеси, определяется адсорбционной способностью закладочного материала и зависит от его минерального состава, дисперсности, вида и количества добавок, введенных в закладочную смесь. Минимальное количество воды, необходимое для образования коагуляционной структуры, соответствует максимальной влагоёмкости закладочного материала. Способность закладочной смеси удерживать определённый объём воды зависит от сил взаимодействия между частицами. Чем плотнее расположены частицы, тем меньше ячейки структурной пространственности сетки и прочее удерживается в ней вода. Если частицы раздвинуты так, что они уже не способны взаимодействовать одна с другой, структурная сетка разрушается, и закладочная смесь отслаивает воду.

В качестве примера осуществления гомогенизации закладочной смеси, в результате которой тиксотропная смесь переходит в состояние золь, можно рассматривать работу активатора-взвихревателя, описанного в [5]. Механические воздействия на тиксотропную смесь превышают силу сцепления между водяными плёнками и частицами, водяные плёнки отрываются от частиц и смесь переходит в состояние золь. В такой смеси происходит физико-механическое перемешивание компонентов, обеспечивающее её высокую однородность и полное использование цемента.

Известно, что содержание в закладочной смеси большого объёма шламистых частиц при традиционной технологии приготовления и транспортирования с относительно большим количеством воды обуславливает резкое снижение прочности даже при повышенном расходе вяжущего компонента, так как шламистые частицы наполнителя (в нашем случае текущие хвосты обогащения), обволакивая агрегативные зерна вяжущего компонента, коагулируют, образуя комки. Кроме того, при транспортировании и укладке происходит старение и расслаивание смеси. Эти факторы и являются в основном причиной резкого ослабления прочности искусственного массива.

Особенностью технологии закладочных работ на основе тиксотропных смесей является возможность применения тонкомолотого заполнителя,

что позволяет использовать для закладки всю массу хвостов обогащения. Кроме того, принимаемая к использованию дисперсная часть хвостов обогащения, т. е. шламы, которые выполняют роль пластификатора, снижая напряжение сдвига, благоприятствуя сокращению износа трубопровода, и могут использоваться как добавка к вяжущему компоненту за счёт эффекта раздвижки зёрен. Этот эффект заключается в том, что после механического разукрупнения зёрен цемента, следовательно, увеличения активной поверхности цементирующего вещества, наличие шламовой фракции препятствует обратному их воссоединению.

Активация цемента, которая происходит при этом, позволяет исключить ещё один недостаток, связанный с тем, что значительная часть зёрен цемента имеет размеры больше 30 мкм. Это не позволяет при традиционной технологии использовать полностью их активность, так как такие зёрна гидратируют только с поверхности, причём толщина слоя гидратации после 6 мес. твердения не превышает 15 мкм [4].

Использование тиксотропных свойств закладочных смесей делает возможным получение закладки, обладающей высокими прочностными и упругими характеристиками при наиболее полном использовании активности вяжущего компонента. Кроме того, тиксотропные смеси обладают необходимой для трубопроводного транспорта подвижностью при значительном (до 2—3 раз) снижении расхода воды. Расход вяжущего компонента при этом уменьшается на 20—22%.

Дадим оценку параметрическим возможностям трубопроводного транспорта тонкодисперсных хвостов. В зависимости от величины концентрации смеси, содержания и свойств минерального вещества тонких классов, закладочная смесь из хвостов может быть представлена средой со слабо или сильно выраженными вязкопластичными свойствами (рис. 1, 2). В первом случае гидросмеси перемещаются как однородные жидкости повышенной плотности и вязкости в характерных для них турбулентных режимах течения потоков. Во втором случае — как вязкопластичные гидросмеси.

Существуют критические значения концентрации и граничные значения скорости движения потоков смесей, при которых псевдовязкие смеси приобретают свойства псевдовязкопластичных. Для условий цветной металлургии критические значения весовых концентраций лежат в пределах 0,6—0,7. Режимы гидротранспортирования смесей в зоне концентраций менее критических наиболее благоприятны как по затратам энергии, так и по технологическим параметрам транспорта (надёжность и повышенные дальности перекачки, маневренность при эксплуатации транспортных систем). Неблагоприятными факторами являются: ухудшение условий использования вяжущего компонента, повышенный водовязущий показатель, потери вя-

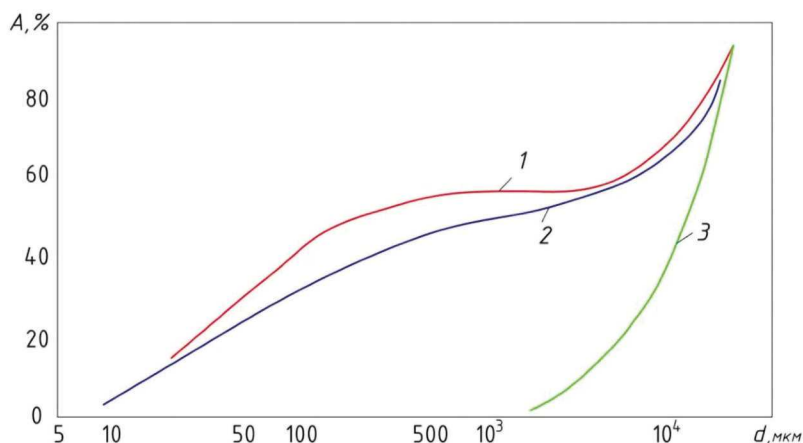


Рис. 1. Графики $A(d)$ гранулометрического состава для закладочных смесей: 1 и 2 — закладочные смеси из хвостов разного вещественного состава и пустых пород с соотношением 1:1; 3 — смеси из пустых пород; d — крупность частиц; A — содержание частиц

жущего компонента в дренажной системе. При дальнейшем повышении концентрации режимы течения определяются реологическими свойствами с повышенными гидравлическими сопротивлениями и менее благоприятны по факторам надёжности, износа, дальности подачи, затрат энергии и др.

С повышением доли содержания тонких классов, что характерно для текущих хвостов, сопротивления движению смесей в трубах резко усиливаются. По экспериментальным данным при повышении концентрации в таких смесях с 0,7 до 0,78 потери напора повышаются на порядок почти с полной потерей текучести [6].

Для снижения затрат энергии и повышения надёжности гидротранспортирования от закупорок в высокоплотные закладочные смеси требуется вводить специальные добавки, разрушающие коагуляционные структуры. При этом сопротивления снижаются в несколько раз.

Итак, в условиях использования в закладочном процессе текущих хвостов руд наиболее очевидная область их использования — это погашение подземных выработок и пустот в массивах горных пород, заиливание обрушенных пород в зонах, опасных по возникновению эндогенных пожаров и произвольных обрушений. Гидросмеси из текущих хвостов, при концентрациях твёрдой фазы меньше критических значений по фактору проявления реологических свойств, благоприятны для перекачки по трубопроводам на значительные расстояния и по трассам самой различной конфигурации. Для освоения указанных способов закладки требуются нетрадиционные технические решения.

В ограниченных масштабах текущие хвосты в современной практике используют в закладочном процессе в виде присадок к другим инертным материалам для твердеющих смесей (аллювиальные пески, дробленые породы отвалов, подземных горных выработок).

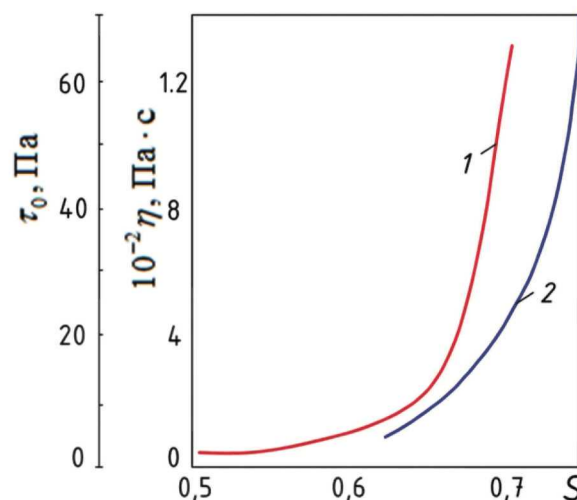


Рис. 2. Графики $\eta(s)$ и $\tau_0(s)$ для хвостов крупностью $d \leq 34-40$ мкм при изменении весовой концентрации гидросмеси S в пределах 0,5—0,75; 1 — $\eta(s)$ и 2 — $\tau_0(s)$, где η — структурная вязкость, τ_0 — начальное напряжение сдвига

Эти технические решения не гарантируют полного использования текущих хвостов, исключаящих хвостовое хозяйство фабрик. Один из радикальных способов утилизации тонкодисперсных хвостов достигается при их окомковании с подготовкой гранул или брикетов, которые можно использовать не только в закладочном процессе, но и для различных хозяйственных нужд.

Резкое изменение конъюнктуры на рынке вяжущих и кондиционных строительных материалов создает определенные препятствия для широкого применения этого эффективного способа закладки. Поэтому первостепенное значение в настоящее время имеет освоение малоцементных и бесцементных способов закладки с использованием наиболее доступных сырьевых источников текущих хвостов и отсевов отвальных пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брюховецкий О.С. Гидравлическая теория транспортирования частиц горных пород в трубопроводах//Сб. научных докл. «Комплексное освоение месторождений твердых полезных ископаемых». В. 1. М.: Недра, 1991. С. 63–76.
2. Брюховецкий О.С. Рудничный напорный гидравлический транспорт горной массы: Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2018, 196 с.: ил.
3. Брюховецкий О.С., Иляхин С.В., Карпиков А.П., Яшин В.П. Основы горного дела: Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2017. 352 с.: ил.
4. Брюховецкий О.С., Смолдырев А.А. Актуальные задачи деформационных процессов в массивах горных пород при разведке и разработке рудных месторождений. Отчёт по НИР, МГГА, М., 1998. 37 с.
5. Брюховецкий О.С., Томских А.А., Левчук А.И. Усовершенствование и внедрение технологии закладочных работ на основе тиксотропных смесей с использованием активатора-взвешивателя на руднике «Каульды». Отчёт по НИР., М.: МГРИ, 1989. 73 с.
6. Смолдырев А.Е. Технология и механизация закладочных работ. М.: Недра, 1974. 328 с.

REFERENCES

1. Bryukhovetskiy O.S. The hydraulic theory of transportation of particles of rocks in pipelines. *Collection of scientific reports «Complex development of fields of solid minerals»*, vol. 1, M., Nedra Publ., 1991, pp. 63–76. (In Russian).
2. Bryukhovetskiy O.S. *Mining pressure hydraulic transport of mountain mass*: Saint-Petersburg: Publishing house «Lan», 2018, 196 p. (In Russian).
3. Bryukhovetskiy O.S., Ilyakhin S.V., Karpikov A.P., Yashin V.P. *Fundamentals of mining*, Saint-Petersburg: Publishing house «Lan», 2017, 352 p. (In Russian).
4. Bryukhovetskiy O.S., Smoldyrev A.A. *Actual problems of deformation processes in rock mass during exploration and development of ore deposits*, M., MGGA, 1998, 37 p. (In Russian).
5. Bryukhovetskiy O.S., Tomskikh A.A., Levchuk A.I. *Improvement and implementation of backfilling technology based on thixotropic mixtures using an activator-sprinkler at the Kauldy mine*. *MGRI-RGGRU*, M., 1989, 73 p. (In Russian)
6. Smoldyrev A.E. *Technology and mechanization of backfilling*, M., Nedra Publ., 1974, 328 p. (In Russian).

УДК 622.02; 622.831.32

ПРИМЕНЕНИЕ И РАЗВИТИЕ МЕТОДА ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ПО ПРОГНОЗУ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ КИТАЯ

ЛАНЬ ТЯНЬВЭЙ^{1,2,3}, ЧЖАН ХУНВЭЙ^{1,3}, ЛИ ШЭН^{1,3}, А.С. БАТУГИН^{3,4},
ЧЖАО ВЭЙГО^{1,5}, ЛИ ЦЯН^{1,5}, СУНЬ ЦЗЮЧЖЭН^{1,5}

¹Ляонинский инженерно-технический университет, Институт горного дела
47, Джонхуа ул., г. Фусинь 123000, провинция Ляонин, КНР
email: ltw821219@163.com

²Китайский горный университет, Государственная лаборатория угольных ресурсов и безопасности добычи
1, Даксю ул., г. Сюйчжоу 221116, провинция Цзянсу, КНР

³Ляонинский инженерно-технический университет,
Центр инженерных исследований по безопасной добыче и утилизации угля
47, Джонхуа ул., г. Фусинь 123000, провинция Ляонин, КНР
email: ltw821219@163.com

⁴НИТУ МИСИС, Горный институт
4, Ленинский проспект, г. Москва 119991, Россия
email: as-bat@mail.ru

⁵Акционерное общество «Угольная компания "Шуан-Яшань"
240, Синсин ул., г. Шуан-Яшань 155100, провинция Хэйлунцзян, КНР

Метод геодинамического районирования прошел в Китае три периода своего развития: «становление», «развитие» и «инновации». С его помощью созданы модели, связывающие блочные структуры тектонических плит земной коры и полей угольных шахт. Разработана программа расчетов напряженного состояния массива горных пород, учитывающая данные геодинамического районирования. Разработана модель многофакторного распознавания и прогноза геодинамической опасности при ведении горных работ. Представляется, что для реализации геодинамических явлений необходимо выполнение определенных условий в окружающем массиве, в связи с чем установлены индексы и методы оценки этих условий. Для исследования связи