

УДК 550.8.052

**Уточнение глубинного строения Пермского края
по результатам интерпретации геопотенциальных полей**

С.Г. Бычков, А.С. Долгаль, А.В. Мичурин
(342) 216-10-08, факс (342) 216-75-02, bsg@mi-perm.ru
Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия

В связи с существенным истощением запасов углеводородов Волго-Уральской нефтегазоносной провинции актуальной задачей является повышение геологической эффективности прогнозно-поисковых исследований. Основой для этих исследований служит структурно-тектоническое районирование, которое в настоящее время выполняется для территории Пермского края, поскольку геофизические исследования последних лет показали, что существующие тектонические карты и схемы нуждаются в существенном уточнении и обновлении [5]. Результаты работ по уточнению тектоники Пермского края и созданию новой тектонической модели позволят определить новые направления нефтегазопоисковых работ в различных тектонических условиях. Важную роль в процессе создания карт тектонического районирования играют интерпретационные построения по материалам гравиметрических и аэромагнитных съемок, выполняемые с применением современных компьютерных технологий, разработанных в лаборатории геопотенциальных полей Горного института УрО РАН.

Исходными материалами для комплексной интерпретации являлись цифровые модели гравитационного и магнитного полей Пермского края, сформированные по данным съемок масштабов от 1:25 000 до 1:200 000. Цифровая модель рельефа земной поверхности сформирована по данным GТОР030, охватывающие всю поверхность Земли и свободно распространяемые в сети Интернет. Сеть задания значений всех параметров составляла 5×5 км.

С использованием программ, реализующих алгоритмы истокообразной аппроксимации [2], т.е. с учетом рельефа поверхности наблюдений, вычислялись различные линейные трансформанты геопотенциальных полей, в частности модули полного горизонтального градиента, пересчет в верхнее полупространство, псевдогравитационное преобразование и т.д.

Предпринята попытка разделения гравитационных эффектов, обусловленных влиянием кристаллического фундамента $\Delta g_{\text{кф}}$ и осадочного чехла $\Delta g_{\text{оч}}$, для чего использовалось несколько подходов:

- геологическое редуцирование, базирующееся на материалах глубокого бурения и региональной сейсморазведки, а также сведениях о петроплотностной характеристике осадочного чехла [4];
- вычисление остаточных гравитационных аномалий, представляющих собой разность наблюдаемого поля силы тяжести и результата его пересчета на уровень 25 км;
- вычисление разности между наблюдаемым гравитационным полем и псевдогравитационным полем на уровне 15 км.

Все три варианта дали близкие между собой результаты, что дает основание доверять полученным картам гравитационного поля, отражающим влияние двух основных структурных этажей верхней части земной коры исследуемой территории. Отдельно для полей $\Delta g_{\text{кф}}$ и $\Delta g_{\text{оч}}$ вычислялись трансформанты, которые затем подвергались качественной интерпретации. Основное внимание при этом уделялось пликативным и дизъюнктивным структурам кристаллического фундамента, определяющим развитие потенциально нефтегазоперспективных комплексов горных пород осадочного чехла.

Особенности полей $\Delta g_{\text{кф}}$ и ΔT_a анализировались путем автоматической классификации данных методом динамических сгущений (k -средних) [3]. Анализируемая совокупность многомерных данных, представленная в виде матриц f_1, f_2, f_3, \dots , включающих сами поля и модули их полных горизонтальных градиентов (G_{xy} и T_{xy} , соответственно)

разбивалась на сравнительно небольшое число статистически однородных непересекающихся таксонов (классов).

Для этого была выбрана метрика – евклидово расстояние $r_m = \sqrt{\sum (\bar{f}_{ij} - \bar{c}_{im}^n)^2}$, где \bar{f}_{ij} – нормированный признак; \bar{c}_{im}^n – центр класса; i – индекс, определяющий номер признака ($i = 1, \dots, p$); j – индекс, отвечающий внутрипризнаковому числу наблюдений ($j = 1, \dots, k$); m – число классов; n – номер итерации в процессе классификации. Выбор метрики исходил из предположения, что многомерные наблюдения взаимно независимы, имеют одну и ту же дисперсию, однородны по своему физическому смыслу и одинаково важны с точки зрения решения вопроса об отнесении объекта к тому или иному классу [1].

Блок-схема алгоритма автоматизированной классификации, реализованного с использованием системы объектно-ориентированного программирования Delphi 7.0, выглядит следующим образом:

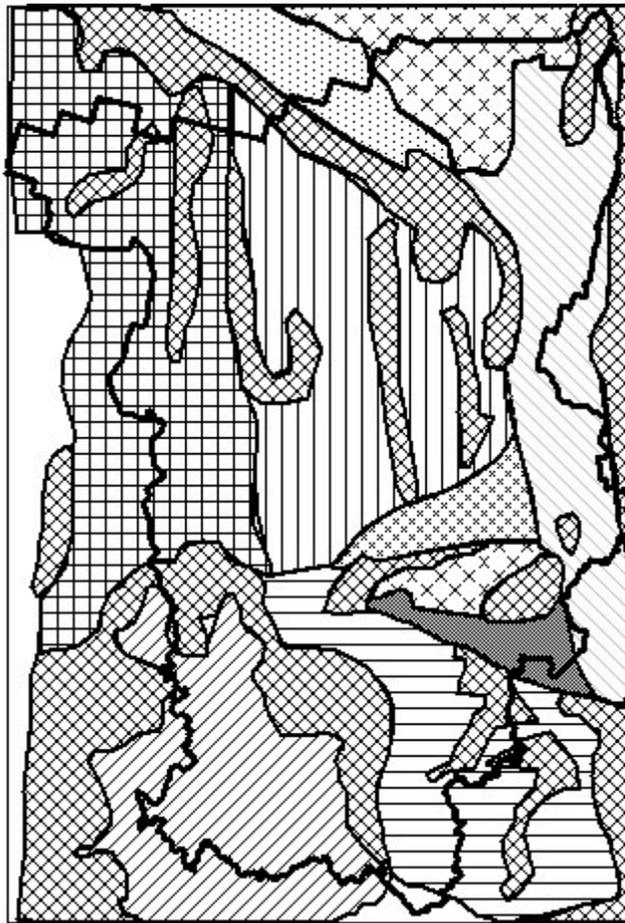
- для всех p обрабатываемых признаков (линейных трансформант гравитационного и магнитного полей) оценивается значение среднеквадратического отклонения σ_i ;
- каждый f_i признак нормируется на соответствующее значение среднеквадратического отклонения $\bar{f}_i = f_i / \sigma_i$;
- для всех нормированных признаков \bar{f}_i оценивается минимальное и максимальное значения, т.е. определяются границы диапазонов изменения признаков;
- задается количество классов m , а так же первоначальные вектора центров классов $\bar{C}_j = \{c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{pj}\}$;
- выполняется классификация нормированных многопризнаковых наблюдений на классы, при этом значение в каждой точке $\bar{x} = \{x_1, \dots, x_p\}$ относится к классу m , если евклидово расстояние r_m от центра этого класса до данной точки является минимальным;
- по результатам классификации выбираются новые вектора центров классов $\bar{C}^n = \{c_{1j}^n, \dots, c_{pj}^n\}$ ($j = 1, \dots, k$), при этом каждая компонента отдельного вектора центров

классов, имеющего размерность m является оценкой среднего $c_{im}^n = \frac{1}{n_m} \sum_{j=1}^{n_m} x_i^m$ ($i = 1, \dots, p$),

рассчитанного по n_m точкам, попавшим в соответствующий класс m после классификации, проведенной на предыдущем шаге алгоритма [3].

Априорно было выбрано четыре класса ($m = 4$). В результате применения описанного выше итерационного алгоритма была получена карта классификации геофизических полей (рис. 1) и определены средние значения признаков внутри каждого из классов (табл.).

Использование метода k -средних позволяет исключить элементы субъективизма при интерпретации геопотенциальных полей Пермского края. Экспериментально доказана хорошая устойчивость алгоритма к выбору первоначальных координат центров классов, что говорит о соответствии получаемых результатов реально существующим закономерностям, характеризующим анализируемый набор данных. Автоматизированная классификация позволила провести свертку весьма большого объема информации ($j = 11123$ точек измерений, $p = 4$ признаков), отражающего разноранговые и разноглубинные петроплотностные и петромагнитные неоднородности.



Условные обозначения:

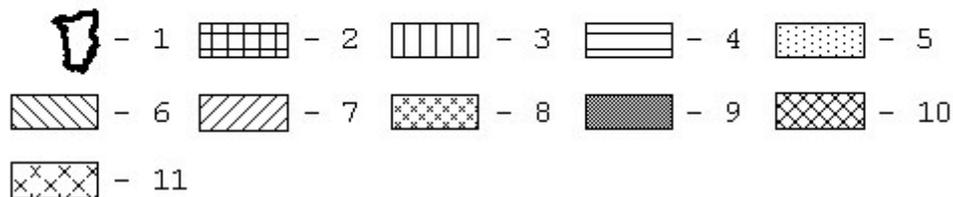


Рис.1. Карта классификации геофизических полей методом k – средних:
 1 – граница Пермского края; 2 – Коми-Пермяцкий беломорский массив;
 3 - Камский беломорский массив; 4 – Красноуфимский беломорский массив;
 5 – Тиманский блок; 6 – Уральская складчатая зона; 7 – Калтасинский авлакоген;
 8 – Краснокамско-Гремяченский горст; 9 – Сылвенский блок-впадина;
 10 – зоны разломов; 11 – таксоны неустановленной геологической природы

Таблица

Характеристика результатов классификации методом k -средних

№ класса	Средние значения признаков в классе			
	$\Delta g_{кф}$, мГал	ΔT_a , нТл	$G_{ху}$, Е	$T_{ху}$, нТл/км
1	-27.14	-126	6.3	12
2	1.69	22	4.1	4
3	7.18	83	3.0	19
4	-1.60	55	8.5	21

В результате проведенной классификации было подтверждено наличие многих ранее выделенных пликативных структур, разломов и ослабленных зон фундамента. Кроме того, появились основания для выделения серии разломов, которые ранее отсутствовали на тектонической схеме строения фундамента Пермского Приуралья; проведено уточнение границ крупных тектонических структур (в частности – беломорских массивов). Построенная в масштабе 1:500 000 карта результатов классификации дополняет имеющиеся представления о глубинном строении исследуемой территории и может служить дополнительным источником информации при построении различных структурно-тектонических схем. Отметим, что такая методика анализа геопотенциальных полей для территории Пермского края применялась впервые.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. Учебник для вузов. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1022 с.
2. Долгаль А.С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемок в горной местности. - Абакан: Фирма «Март», 2000. – 188 с.
3. Никитин А.А., Петров А.В. Теоретические основы обработки геофизической информации: учебное пособие. – М.: ООО «Центр информационных технологий в природопользовании», 2008. – 114 с.
4. Новоселицкий В.М. Физические свойства пород осадочного чехла севера Урало-Поволжья / В.М. Новоселицкий, В.М. Проворов, А.А. Шилов. – Свердловск: «Уральский рабочий», 1985. – 136 с.
5. Проворов В.М. О необходимости и значении уточнения тектоники территории Пермского края // Современные проблемы геологии: материалы IV геологической конференции и X конкурса работ молодых ученых ОАО «КамНИИКИГС», 3 апреля 2008. – Пермь, 2008. – С. 24-37.

УДК 550.83

Опыт изучения информативных характеристик вызванной акустической эмиссии в нефтенасыщенных пластах терригенного типа

*В.В. Дрягин, Г.В. Иголкина, Д.Б. Иванов
(8343)267-97-27, (8343)267-88-72, galinaigolkina@yandex.ru
Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

Упругие волны, искусственно возбуждаемые в горном массиве для решения различных технологических задач, при взаимодействии со средой вызывают вторичное излучение – акустическую эмиссию. Механизм эмиссии связан в основном с двумя процессами, первый с образованием новых трещин в кристаллических массивах и второй с гидродинамическими процессами во флюидонасыщенных геологических слоях.

Возможность и перспективы технологий акустического воздействия (АВ) безграничны и требуют особого внимания, как научных кругов, так и нефтедобывающих, геофизических и приборостроительных организаций.

В результате исследований различными авторами [1-4] установлена геофизическая закономерность вторичного излучения сейсмической энергии на «доминантных частотах» залежи нефти и длительности протекания процессов его становления и релаксации. Источником и причиной вторичного излучения при этом служит активизация геодинамических процессов различного масштаба во времени и пространстве. По времени эти процессы совпадают с параметрами работы различного рода источников виброволнового воздействия, включая наземные и скважинные вибраторы и лежащие в диапазоне десятков и сотен герц, а также возникновение и усиление высокочастотной сейсмической и

акустической эмиссии нефтепродуктивного пласта в звуковом диапазоне частот: 10-11 кГц и 2-3 кГц, имеющих наибольшую интенсивность. Развитие резонансных колебаний в трещиновато-блочных пластах за продолжительное время создают условия для генерации в пластах ультразвуковых волн, способных разрушать загустевшие нефтяные пленки в трещинах коллектора, что собственно и служит технологическим эффектом повышения нефтеотдачи месторождения [1-4].

В связи с тем, что силовое акустическое воздействие влияет на проницаемость нефтяного пласта, стала очевидной необходимость установить связь между параметрами проницаемости, а также характером насыщенности порового пространства и динамикой сигнала сейсмоакустической энергии (САЭ). Сопоставляя данные эмиссионного каротажа с геофизическими данными стандартного комплекса ГИС и результатами промысловых испытаний, можно получить критерии правильности оценки наличия углеводородов в поровом пространстве пласта коллектора, а также их фильтрационную способность.

Корреляционная зависимость сейсмоакустической эмиссии с коэффициентом проницаемости становится заметной после облучения насыщенного порового пространства силовым акустическим полем, в то время как сопоставление проницаемости рассчитанной по стандартным методикам геофизических исследований скважин (ГИС) с естественным эмиссионным фоном показывает практическое отсутствие связи между ними.

При этом сам коэффициент корреляции не высок, поскольку приходится сравнивать непрерывную функцию спектральной плотности энергии от глубины скважины с линейно-кусочной функцией расчетного коэффициента проницаемости $K_{пр}$, полученного по данным ГИС, однако изменение корреляции составляет сотни процентов.

Усиление связи сигнала вызванной САЭ с проницаемостью коллектора происходит за счет проявления энергии в новой высокочастотной области, которая совершенно отсутствовала в фоновом сигнале [5,6] и которая является характерной для этого типа коллектора и соответствующей насыщенности нефтью. Практическое отсутствие корреляции проницаемости с фоновым сигналом САЭ, объясняется тем, что основной вклад в энергию сигнала САЭ вносят низкочастотные составляющие, которые никак не связаны с доминирующими высокими частотами эмиссии не возбужденного пласта, а имеют более широкое пространственное и временное происхождение.

Сигнал сейсмоакустической эмиссии, которым мы оперируем, определяется как изменяющаяся стохастическая физическая величина, содержащая информацию об источнике акустической эмиссии, и находится в соответствии с атрибутами классического определения акустико-эмиссионного неразрушающего контроля, который широко применяется в различных отраслях техники [7].

Оценка фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) прискважинного пространства продуктивного пласта будет опираться на исследование параметров акустического поля генерируемого источником акустической эмиссии. Источником акустической эмиссии, в данном случае, служит область продуктивного пласта подвергнутая облучению таким силовым акустическим полем, параметры которого, мощность и частота, эффективно влияют на изменение ФЕС [2]. Причем, как показали результаты независимых гидродинамических испытаний, изменения происходят как в ближней зоне пласта, так и в удаленной. Из этого следует, что источник акустической эмиссии может находиться в пределах и за пределами закольматированной зоны пласта, что особенно важно для оценки истинного насыщения продуктивного пласта. Однако необходимость локализации источника акустической эмиссии собственными средствами аппаратуры является особенно актуальной и принципиально достижимой, поскольку при этом используются одни и те же принципы излучения и приема характеристик поля упругих колебаний.

Каковы же эти характеристики? На рис.1 приведен пример записи сигнала САЭ после акустического воздействия в скважине № XX45 Тевлинско-Русскинского месторождения во вновь пробуренных интервалах пластов Баженовской свиты БС10(2+3). Исходный сигнал, его фрагмент и спектральный состав (приведены на графиках). Приток нефти из этого

интервала после перфорации составил 34 т/сут., с обводненностью 2%. Принятие решения о выборе интервала перфорации производилось с использованием информации каротажа САЭ.

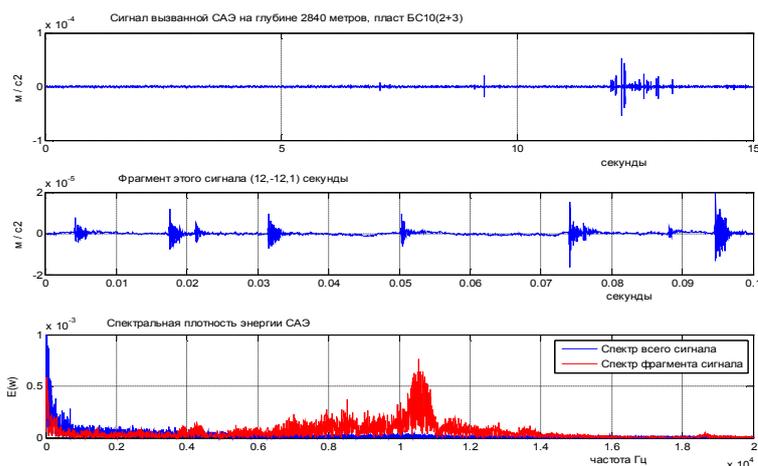


Рис.1. Пример записи сигнала САЭ после акустического воздействия в скважине № XX45 Тевлинско-Русскинского месторождения во вновь пробуренных интервалах пластов Баженовской свиты БС10(2+3).

Энергия акустической эмиссии, выделяемая ее источниками в исследуемом интервале записи определялась экспресс методом вычисления спектральной плотности энергии во всем регистрируемом диапазоне частот и регистрировалась специальной каротажной станцией. Среднее увеличение сигнала САЭ составляло (12-42)% прироста относительно фона, в то время как события акустической эмиссии в виде единичных действий источников эмиссии происходили случайным образом, но имели при этом характерные параметры импульсов сигнала АЭ конечной длительности, определенной формы с определенным максимальным значением энергии и частоты заполнения. Было отмечено, также как и в трудах академика Алексева А.С., наличие доминирующих частот в составе АЭ. Для данного геологического объекта доминирующая частота в области (10-11) кГц была определена путем детального частотного анализа всех импульсов АЭ.

Для сравнения приведем таблицу 1 измеренных параметров САЭ на разных месторождениях, а также данные, полученные другими авторами.

Таблица 1

Объект Месторождение	Доминирующая частота [кГц]	Ускорение [м/с ²]	Скорость [м/с]	Смещение [м]	Примечание
БС10(2+3) Тевлинско-Русскинское Глубина 2840м	10-11	5,4*10 ⁻⁵	1,68*10 ⁻⁹	9,03*10 ⁻¹⁵	Каротаж САЭ в цикле К-АВ-К
Ач1 Кальчинское Глубина 2740м	2,5	1,4*10 ⁻⁵	0,47*10 ⁻⁹	41*10 ⁻¹⁵	Каротаж САЭ в цикле К-АВ-К
Габбро трещиноватое Скважина ИГ1 Глубина 105м	8	2,7*10 ⁻³	6,46*10 ⁻⁹	128*10 ⁻¹⁵	Каротаж САЭ после удара возле устья скважины (2,6) кДж
Правдинское Глубина (1500-3000)м	(2-10)	-	3,8*10 ⁻⁹	-	Работа вибратора 50 тонн (данные Алексева)

Пятые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича, 2009 г.

Микросейсм в скважине на глубине (1000-3000) м	-	-	(1,6 - 6,6) *10 ⁻⁹	-	Исследования при ВСП (данные МГУ)
Сейсмический сигнал в скважине на глубине 4000м	-	-	(0,066 – 0,16)*10 ⁻⁶	-	Исследования при ВСП (данные МГУ)

Сопоставление параметров эмиссионных сигналов с геологическими характеристиками месторождений позволило установить зависимость их спектрально энергетической характеристики и доминирующих частот с поровым или трещиноватым видом фильтрационных свойств коллектора. Так, в разрезе Тевлинско-Рускинского месторождения выявлены несколько продуктивных пластов: БС10 (2+3), БС11(1+2) залегающих на глубинах 2500-2900 метров. Пласты сложены мелко-зернистыми песчаниками с прослоями алевролитов и аргиллитов. Коллекторами являются песчаники и алевролиты не коллекторами аргиллиты и глины. Фильтрационно- емкостные свойства этих коллекторов изменяются в широких пределах: пористость от 21,2% до 26,9%, проницаемость - от 2 мД до 444 мД.

По результатам промышленных испытаний на приток нефти из этих пластов и сопоставления с данными КСАЭ установлено, что их продуктивность определяются поровыми и трещиноватыми типами коллекторов, которые различным образом выделяются по доминирующим частотам и динамике их энергии после акустического воздействия. Так коллекторы с проницаемостью (2-12)мД обладают доминантными частотами (6-9) кГц и имеют прирост 30-40 % относительно фоновой, при испытаниях на приток обеспечивают дебит 34 тонны в сутки нефтью с обводненностью не превышающей 2%.

Аналогичные испытания коллектора с проницаемостью (221-444)мД показали дебит 40 тонн в сутки, при этом параметры акустической эмиссии составляют: доминирующая частота –(10 -12) кГц, прирост (90-180)% относительно фоновой. Для этих коллекторов характерно проявление второго диапазона доминантных частот в области (2-4) кГц с динамикой в 2-3 раза меньшей, чем предыдущая частота.

Всего по объектам Баженовской и Ачимовской группы месторождений выполнены исследования в более чем в 40 скважинах, в которых производились сравнительные испытания по определению характера насыщенности другими методами ГИС и промысловые испытания на приток нефти. На рис.2 приведен фрагмент исследований скважины методом каротажа САЭ в цикле: каротаж САЭ – акустическое воздействие – каротаж САЭ.

Изменение активности эмиссии по разрезу пласта носит резко не однородный характер, что свидетельствует о сильной неоднородности пласта – коллектора в отношении его фильтрационно - емкостных свойств. Стрелками показан интервал перфорации колонны из которого получен приток нефти.

Виду специфических особенностей источников эмиссии и генерируемого ими акустического поля, в форме коротких импульсов имеющих высокочастотное заполнение, спектральный анализ всей временной реализации сигнала САЭ носит характер фликер шума, т.е. убывание амплитуды обратно пропорционально частоте. Поэтому для экспресс- анализа использовался метод пикового усреднения при вычислении спектральной плотности энергии сигнала.

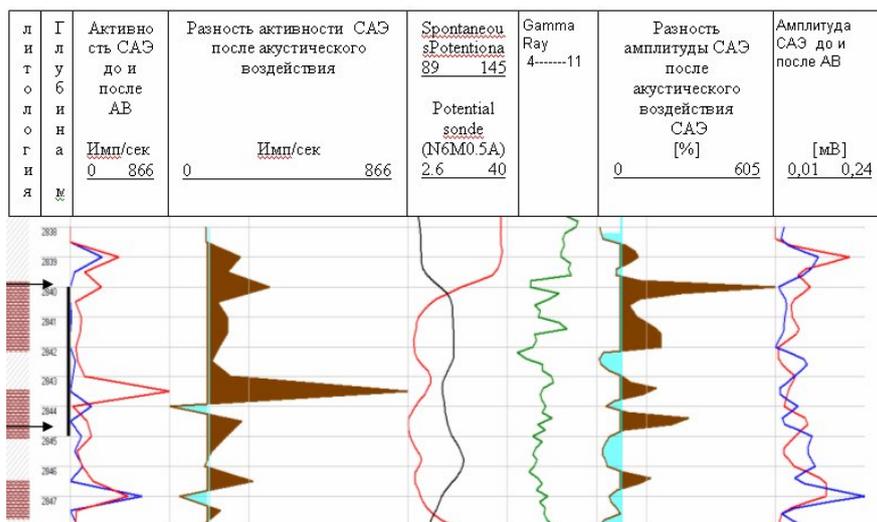


Рис. 2. Скважина №XX45 Тевлинско-Русскинского месторождения, пласт БС10(2+3).

Для выявления характерных частот быстро протекающих процессов вызванных локальной динамической перестройкой структуры насыщенного порового пространства или его состояния становится важным определить динамические характеристики сигнала вызванной эмиссии в процессе ее возникновения и затухания до исходного состояния. Применение для этих целей оконного преобразования Фурье и построения временных спектрограмм наглядно отражает изменение распределения спектральной плотности энергии, но не дает количественной оценки процесса и обладает существенным недостатком, связанным с неизбежным усреднением величины энергии в интервалах времени преобразования.

Кроме того, необходимо рассмотреть динамику процесса вызванной эмиссии не только во времени, но в масштабе прискважинного пространства продуктивного пласта с тем, чтобы выявить его геологические особенности структуры пространства и свойств связанных с характером насыщения.

Для задач анализа одномерных временных рядов, с недавних пор используется способ спектрально- сингулярного анализа SSA «гусеница». Способ состоит в преобразовании одномерного ряда в многомерный и исследовании полученной многомерной траекторной матрицы методом главных компонент. При этом оказывается возможным выделить отдельные слагаемые исходного ряда, такие как медленный тренд общего вида, периодические составляющие (если они есть) и случайные вариации (шум).

В нашем случае проводилось сингулярное разложение временного ряда записи сигнала эмиссии, результатом которого являлось определение главных компонент с соответствующими им доминантными частотами и процентным вкладом в общий сигнал.

Анализ результатов разложения показал, что основными частотами для фоновых записей являются низкие частоты (первые сотни герц) и процентный разброс среди этих компонент является очень сильным. Наибольший вклад вносит первая низкочастотная компонента. Ее величина составляет порядка 80-95% от общего сигнала. Отмечается наличие в фоновых записях и средних частот (порядка 2,5кГц), однако их процентный вклад составляет десятки доли процентов.

После проведения акустического воздействия происходит резкое изменение распределения частот в сигнале и их процентного вклада. Низкочастотная составляющая на порядок уменьшается, возрастает процентный вклад средних частот до 50-60%, и появляются высокочастотные компоненты (порядка 10кГц) до 5-10%, отсутствовавшие в фоновых записях. Этот метод позволил получить наглядное отображение динамики сигнала эмиссии после акустического воздействия и выявить доминирующие частоты процесса вызванной акустической эмиссии. На рис 3. приведены графики распределения

главных компонент сигнала САЭ до и после акустического воздействия в исследуемом интервале продуктивного пласта 2740 – 2745 метров скважины № XX45.

Акустическое воздействие на этой скважине проводилось в два этапа, после каждого производилась запись САЭ. На рис 3(а) разложение фонового сигнала САЭ по главным компонентам отражает достаточно равномерное распределение энергии по частотным составляющим, но с наличием проявления высокочастотной составляющей в интервале (2842,5-2843) метра, порядка (10-12) кГц. Сразу после воздействия частотное распределение энергии резко изменяется рис.3 (б, в) при этом отчетливо выделяются интервалы пласта с доминирующими высокими частотами. После второго воздействия распределение носит такой же ярко выраженный характер, но имеет смещение по разрезу пласта. Вероятно, процесс изменения свойств насыщенного пространства пласта имеет свое развитие под влиянием последующих воздействий.

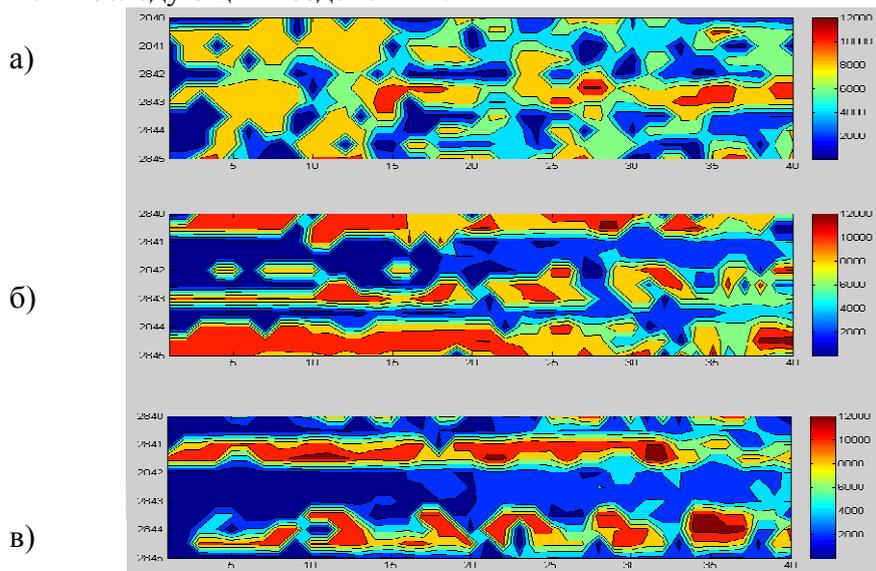


Рис.3. Диаграммы распределения энергии САЭ в интервале нефтеносного пласта до и после АВ. Обозначения: а) фоновая запись САЭ; б) сигнал САЭ после первого акустического воздействия; в) сигнал САЭ после второго воздействия. По вертикальной оси - глубина скважины в метрах, по горизонтальной оси - главные компоненты сингулярного разложения с 1 по 40 по убыванию процентного вклада, что соответствует убыванию вклада с 86% до 0,001%, на цветной шкале показаны частоты главных компонент в герцах.

Конечным результатом этого процесса служит восстановление проницаемости порового пространства пласта, как было показано в ранних работах по акустическому воздействию. Здесь же мы видим отражение начала этого процесса и его стадии, которые необходимо увязать с изменением тонкой структуры порового пространства, прежде всего в соотношении взаимодействия флюида и твердого проницаемого пространства.

За 2008 год было выполнено 23 полевые работы на Западно-Сибирских месторождениях (Ватьеганское, Восточно-Придорожное, Кустовое, Повховское, Северо-Кочевское, Тевлинско-Русскинское, Южно-Вийнтойское, Южно-Покачевское, Южно-Ягунское).

Изложенные в работе результаты исследований позволяют сделать следующие выводы и рекомендации: определены критерии оценки нефтегазонасыщенности коллекторов, в основе которых положена динамика сейсмоакустической эмиссии на акустическое воздействие в скважинном варианте; закономерность эмиссионного отклика позволила создать аппаратно-методические основы каротажа вызванной сейсмоакустической эмиссии для целей определения характера насыщенности пластов коллекторов.

Существующие технологии волнового воздействия на месторождения нефти, в комплексе с методикой определения текущего содержания нефти и воды в пластах на

основе исследования эмиссионного отклика залежи на сейсмические, акустические и гидроударные импульсы, позволит оценить перспективность скважин и продуктивных пластов к повышению извлекаемости нефти и интенсификации нефтедобычи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев А.В. Развитие методов нелинейной геофизики. «Вестник ОГГГН РАН» №1(20) 2002.
2. Митрофанов В.П., Дзюбенко А.И., Нечаева Н.Ю., Дрягин В.В. Результаты промысловых испытаний акустического воздействия на призабойную зону пласта// Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. 1998. №10.
3. Алексеев А.С., Цецохо В.А., Белоносова А.В., Белоносов А.С., Сказка В.В. Вынужденные колебания трещиновато-блочных флюидонасыщенных слоев при вибросейсмических воздействиях//СО РАН. Геомеханика. №6. 2001г. с3-13.
4. Николаевский В.Н., Степанова Г.С. Нелинейная сейсмика и акустическое воздействие на нефтеотдачу пласта// Акустический журнал, 2005г., Том 51. Выпуск «Геоакустика», с. 150-159.
5. Дрягин В.В., Кузнецов О.Л., Стародубцев А.А., Рок В.Е. Поиск углеводородов методом вызванной сейсмоакустической эмиссии// Акустический журнал, 2005, Том 51. Выпуск «Геоакустика» с. 66-73
6. Алексеев А.С., Сердюков С.В., Дрягин В.В., Иголкина Г.В., Иванов Д.Б. Комплексная технология мониторинга нефтедобычи и заводнения месторождения волновыми методами//Всероссийская конференция «Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности», Москва, 2007 г. с.8-9.
7. ГОСТ 27655-88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения. М.: Изд-во стандартов, 1988.

УДК 550.361

Мерзлота и зоны стабильности гидратов метана и углекислого газа в Западной Сибири

А.Д. Дучков, Л.С. Соколова, тел. 383-3302591, факс 383-3332513, DuchkovAD@ipgg.nsc.ru
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск,
Россия

При подготовке электронного «Геотермического атласа Сибири» [1] большим коллективом исследователей была собрана обширная информация о температурном поле осадочного чехла Западной Сибири. База данных включает результаты измерений температуры примерно по 500 скважинам глубиной от 100 до 4000 м, расположенным на 380 участках. По этим данным, с учетом материалов из работ [2-5], построены в программе Arc-View карты расположения изотерм 0⁰С, достаточно точно определяющих расположение в разрезе слоя мерзлых пород (мерзлоты или криолитозоны). Рассмотрим полученные результаты.

Криолитозона. Многолетнемерзлые породы присутствуют в верхней части осадочного чехла Западно-Сибирской плиты вплоть до широтного течения р. Оби (до 60-61⁰ с.ш.). Геокриологи выделяют в Западной Сибири несколько типов криолитозоны, из которых для нас здесь важно отметить блок непрерывной (сплошной, сливной) мерзлоты, начинающейся практически с поверхности, и погребенную мерзлоту. На западе региона непрерывная мерзлота заканчивается примерно на широте Полярного круга (66⁰30' с.ш.), а на востоке доходит до 65⁰ с.ш. Южнее этих широт вследствие потепления климата в голоцене мерзлота постепенно оттаивает с поверхности и перекрывается слоем талых пород (блок погребенной мерзлоты). Мощность слоя талых пород определяется нулевой изотермой или верхней границей мерзлоты, которая присуща только южной части криолитозоны Западной Сибири. Глубина расположения верхней границы изменяется от десятков метров на 66-65⁰

с.ш. до 120-140 м на 62⁰ с.ш. Глубина залегания нижней границы криолитозоны (рис. 1) определяется температурными условиями холодных эпох в верхнем плейстоцене и внутриземным тепловым потоком, ограничивающим распространение холодной волны.

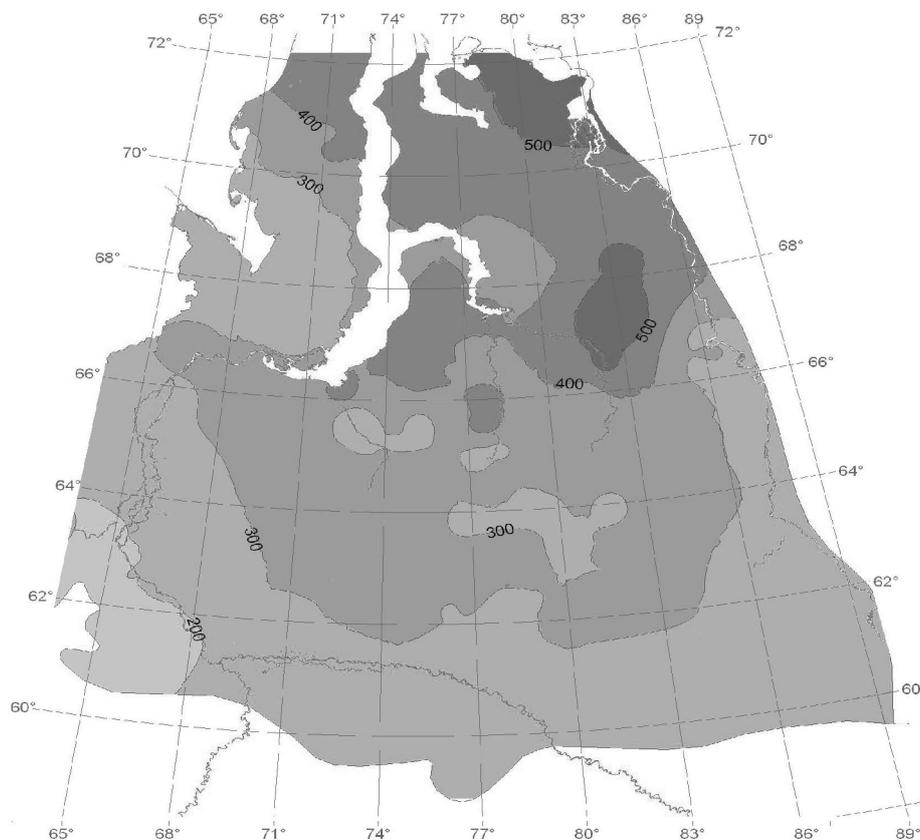


Рис. 1. Глубина расположения нижней границы криолитозоны в Западной Сибири (глубина от поверхности земли, оцифровка изолиний в метрах)

Наиболее глубоко, до 500-600 м, мерзлота распространяется на Крайнем Севере. К югу нижняя граница мерзлоты постепенно поднимается до 300 м на широтах 64-62⁰ и выклинивается.

Похолодание климата в плейстоцене не только привело к образованию мерзлоты в Сибири и Северной Америке, но также и создало в части разреза благоприятные условия (низкие температуры и высокие давления) для формирования газовых гидратов [7]. Сформировались так называемые зоны стабильности газогидратов (ЗСГ), границы которых определяются не только температурой, но и давлением. В данной работе мы определили расположение зон стабильности гидратов метана (ЗСГМ) и углекислого газа (ЗСГУ) в верхней части осадочного разреза Западно-Сибирской плиты. Для этого использовалась ранее упомянутая геотермическая информация и фазовые диаграммы систем H_2O-CH_4 и H_2O-CO_2 [6, 7].

Зона стабильности гидратов метана представляет интерес в связи с тем, что только в её пределах возможно формирование скоплений гидратов метана, которые могут содержать огромные запасы природного газа. Верхняя граница ЗСГМ в северной части региона располагается на глубине 200 м. К югу она незначительно погружается до 230-250 м. Пространственные изменения нижней границы ЗСГМ (рис. 2) более значительны. Наибольшую мощность ЗСГМ имеет в северо-восточной части плиты, где её нижняя граница располагается на глубинах 700-900 м.

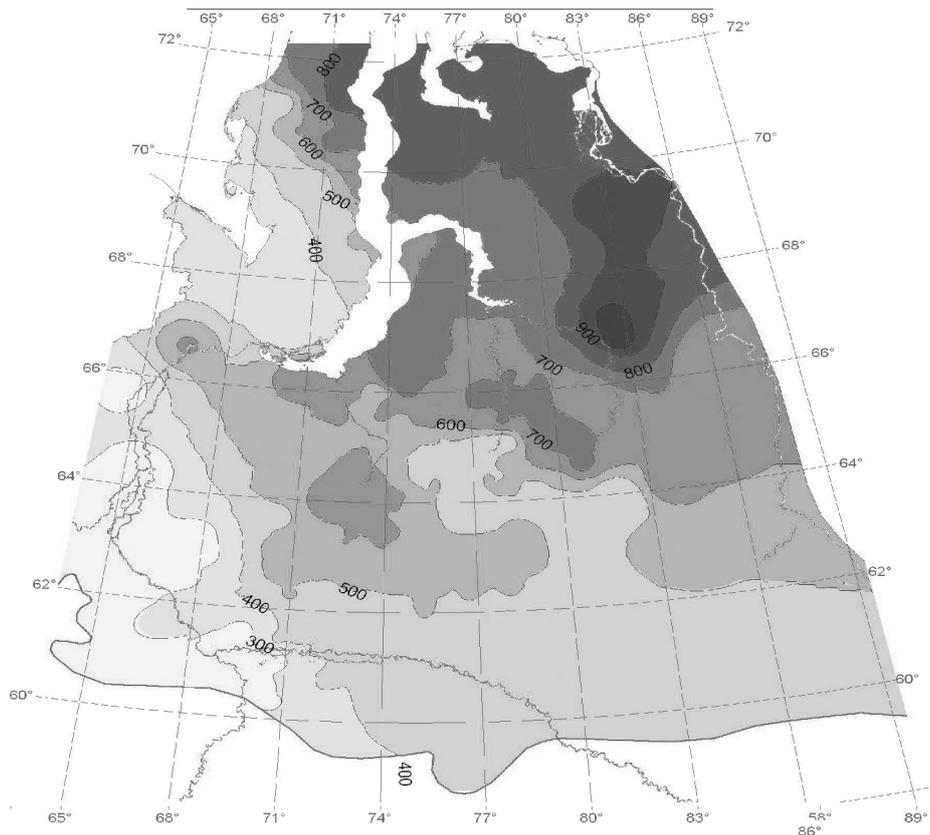


Рис. 2. Глубина расположения нижней границы зоны стабильности гидратов метана в Западной Сибири (глубина от поверхности земли, оцифровка изолиний в метрах)

К юго-западу и югу нижняя граница поднимается до 300 м и постепенно смыкается с верхней границей. Очевидно, что нижняя граница ЗСГМ повсеместно опускается ниже мерзлых пород и состоит, таким образом, из двух частей: мерзлой и талой. В западносибирскую ЗСГМ входят в основном отложения палеогена и частично верхнего мела. На севере региона в непосредственной близости от подошвы ЗСГМ находятся газовые залежи сеноманского горизонта.

Уже длительное время перспективы обнаружения в Западной Сибири скоплений гидратов метана оцениваются весьма высоко [7]. Так, более 40 лет считается, что гидраты метана присутствуют в верхней части (входящей в ЗСГМ) залежи Мессояхского газового месторождения, залегающего в породах сеноманского яруса. В то же время высказываются и обоснованные сомнения на этот счет [8]. Считается, что более благоприятные условия для формирования скоплений гидратов метана существуют в коллекторах туронского яруса, залегающих выше сеноманских отложений, например, в пределах Восточно-Мессояхской площади [9]. В то же время приходится констатировать, что на севере Сибири (в том числе и в Западной Сибири) природные газовые гидраты до сих пор в кернах не поднимались, несмотря на значительные объемы бурения и выявление косвенных признаков их наличия. Мы полагаем, что результаты могли быть более существенными при проведении в Сибири специального бурения, ориентированного на поиски газовых гидратов. Хотя возможно есть и объективные причины для подобной ситуации. Наиболее часто обсуждаются два механизма формирования скоплений газогидратов в мерзлотных районах [7]. Во-первых, возможно формирования гидратов при попадании в плейстоцене в ЗСГМ уже сформировавшихся газовых месторождений (предполагается, что это и произошло с залежью Мессояхского месторождения). В Западной Сибири основной газовый потенциал связан с сеноманскими отложениями, размещенными в основном глубже ЗСГМ. Во-вторых, гидратная залежь может образоваться при поступлении природного газа из более глубоких горизонтов в зону стабильности. Последний механизм может быть реализован только в процессе формирования

ЗСГМ (опускания ее нижней границы) в пределах водонасыщенного коллектора при поступлении достаточного количества газа. Именно такие условия сложились в плейстоцене в осадках над газовым месторождением Маллик в дельте реки Макензи (арктическое побережье Канады), что и привело к формированию здесь на глубине 890-1100 м (нижняя часть ЗСГМ) в грубозернистых песках олигоцена мощной залежи (при бурении поднято порядка 110 м гидратсодержащих осадков) гидратов метана [10]. Мощность кайнозойских отложений в этой части североамериканского континента достигает 2-х км. Установлено, что газ поступал при формировании гидратов с глубины 4-5 км по разломной зоне. Судя по имеющимся данным, на севере Западной Сибири имеются все перечисленные условия, необходимые для реализации второго механизма, кроме одного: здесь нет подходящих коллекторов, так как на севере Западной Сибири кайнозойские отложения не развиты (неоген порядка 200 м, палеоген 300-400 м) [11].

Зона стабильности гидратов углекислого газа. В последние годы мерзлота Западной Сибири и связанная с ней ЗСГУГ привлекают внимание как возможный объект захоронения излишков углекислого газа. Эта тема возникла в связи с общей озабоченностью мирового сообщества проблемой потепления климата. Последнее обычно принято связывать с быстрым возрастанием концентрации CO_2 в атмосфере. По Киотскому соглашению (1-10 декабря 1997 г.) для стабилизации обстановки предлагается комплекс мер, направленных на снижение поступлений парниковых газов в атмосферу на 60% в последующие 50 лет [12]. Свои обязательства в этом плане имеет и Россия. Комплекс мер включает не только внедрение новых технологических схем, переход на новые источники энергии, но также извлечение CO_2 из атмосферы и захоронение его в подземных формациях. Нефтяная индустрия уже практикует захоронение CO_2 в нефтегазовых коллекторах; в качестве подходящих геологических объектов рассматриваются глубокозалегающие отработанные угольные пласты, соляные шахты, а также коллектора, перекрытые сплошным слоем многолетнемерзлых пород [13]. В последнем случае мерзлота рассматривается в качестве экрана, так как мерзлые льдонасыщенные породы непроницаемы для воды и газа. Сведения о мерзлоте Западной Сибири рассмотрены выше. Здесь полезно только отметить, что наибольший интерес в этом плане представляет область распространения непрерывной мерзлоты, так как только здесь можно быть уверенным в монолитном строении тела мерзлых пород и его экранирующих свойствах. Погребенная мерзлота, разбитая таликами на отдельные блоки, не является монолитным экранирующим телом и соответственно не может быть рекомендована в качестве экрана при захоронении CO_2 . В то же время, очевидно, что экранирующие свойства мерзлоты (в том числе и погребенной) усиливает наличие зоны стабильности гидратов углекислого газа. Используя геотермические данные, мы определили расположение верхней и нижней границ ЗСГУГ в разрезе Западной Сибири. Верхняя граница в районах крайнего севера залегает на глубинах 90-100 м, южнее она погружается до 140-150 м на широтах 64-62° с.ш. На севере нижняя граница (рис. 3) размещается на глубине 700-800 м. К югу и юго-западу мощность ЗСГУГ уменьшается, и нижняя граница постепенно поднимается. Так, на широте 62° с.ш. она располагается на глубине 500-600 м. После полного исчезновения мерзлоты и прогревания пород (уже за пределами обозначенной на рис. 3 площади) нижняя граница ЗСГУГ резко поднимается и смыкается с верхней.

Выполненные оценки показывают, что зона стабильности гидратов CO_2 занимает огромный объем мерзлых и талых водонасыщенных осадочных пород, включая и погребенную часть криолитозоны. В целом параметры зон стабильности гидратов метана и углекислого газа (рис. 2 и 3) имеют много общего. Различия связаны с особенностями фазовых диаграмм. Резюмируя, следует сделать вывод, что наиболее целесообразно закачивать CO_2 в коллектора, расположенные ниже зоны стабильности. В этом случае в качестве экранов на пути CO_2 , утекающего из ловушек, будут служить глинистые покрышки, зона стабильности, и, наконец, мерзлые породы. Очевидно, что выбор разрезов, благоприятных для захоронения углекислого газа, потребует более детального изучения

характерных особенностей криолитозоны Западной Сибири, ее границ, протяженности, температуры.

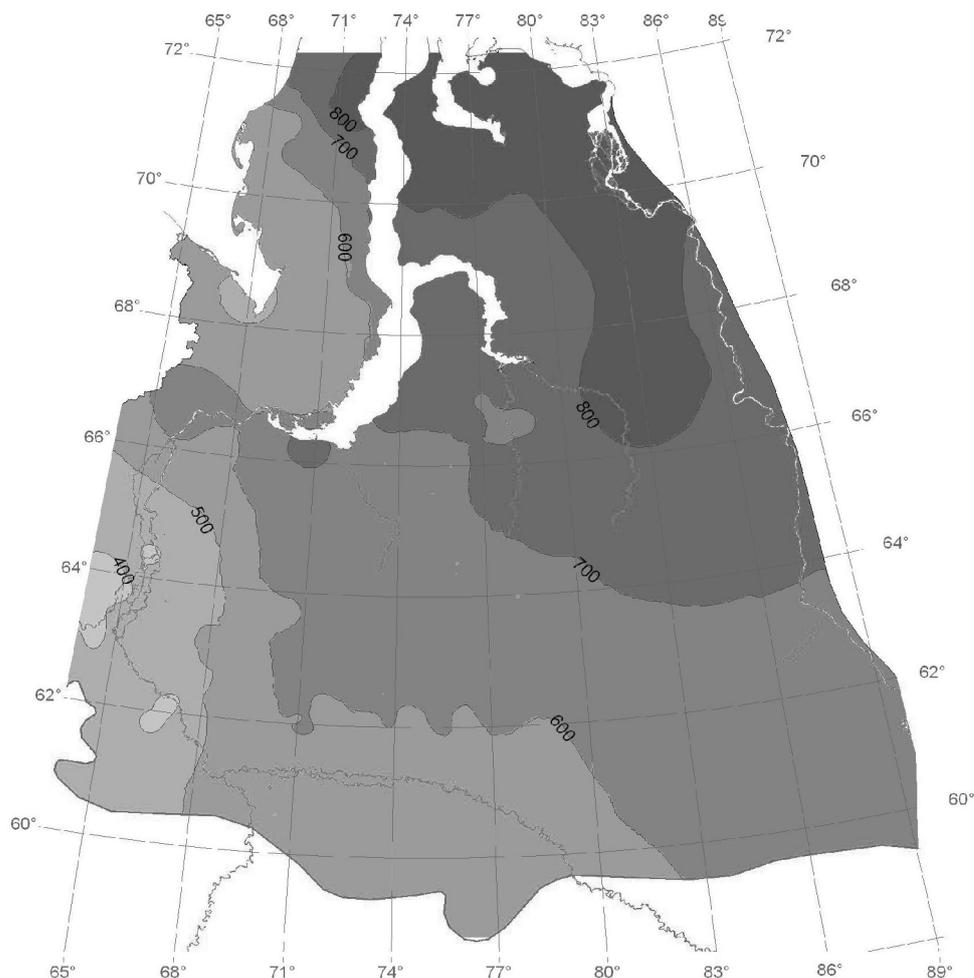


Рис. 3. Глубина расположения нижней границы зоны стабильности гидратов CO_2 в Западной Сибири (глубина от земной поверхности, оцифровка изолиний в метрах)

В настоящем сообщении по геотермическим данным, полученным по скважинам Западной Сибири, выполнены для оценки параметров мерзлоты, а также зон стабильности гидратов метана и углекислого газа. Полученные результаты могут быть использованы при оценке потенциальных ресурсов гидратов метана, при выборе площадей для постановки специального бурения на метангидраты, при проектировании работ, ориентированных на захоронение излишков углекислого газа в подземных коллекторах.

Благодарности: Авторы благодарят М.Н. Железняка и Яна Клеркса за обсуждение и доброжелательную критику работы, Д.Е. Аюнова за помощь при построении карт. Исследования поддержаны грантом ИНТАС № 06-1000025-9220 и Интеграционным проектом ОНЗ РАН №7.1 «Мерзлотно-геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока».

ЛИТЕРАТУРА

1. Дучков А.Д., Л.С. Соколова, 2003. Геотермический атлас Сибири / А.И. Ханчук (ред). Закономерности строения и эволюции геосфер. - Хабаровск: ДВО РАН. – 2003. С.45-56.
2. Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии.- Новосибирск: Наука. – 1991. - 194 с.
3. Дучков А.Д., Балобаев В.Т., Девяткин В.Н., Ан В.В., Соколова Л.С. Геотермическая модель криолитозоны Западной Сибири // Геология и геофизика. – 1995. Т. , №8. – С.32-142.

4. Melnikov V.P., Drozdov D.S. Distribution of permafrost in Russia / In: Advances in the geological storage of carbon dioxide. // S. Lombardi, L.K. Altunina, S.E. Beaubien (Eds.).- NATO Science Series. Berlin: Springer Publishing.- 2006.- P. 69-80.
5. Duchkov A.D.. Characteristics of permafrost in Siberia / In: Advances in the geological storage of carbon dioxide. // S. Lombardi, L.K. Altunina, S.E. Beaubien (Eds.).- NATO Science Series. Berlin: Springer Publishing.- 2006.- P. 81-92.
6. Jadhawar P., Mohammadi A.H., J. Yang, B. Tohidi. Subsurface carbon dioxide storage through clathrate hydrate formation. / In: Advances in the geological storage of carbon dioxide. // S. Lombardi, L.K. Altunina, S.E. Beaubien (Eds.).- NATO Science Series. Berlin: Springer Publishing.- 2006.- P. 111-126.
7. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях.- М.: Недра.- 1992.- 235 с.
8. Гинсбург Г.Д., Новожилов А.А., Дучков А.Д., Прасолов Э.М., Заварзин И.В., Коллетт Т.С. Присутствуют ли природные газовые гидраты в сеноманской залежи Мессояхского газового месторождения? // Геология и геофизика.- 2000.- Том 41, №8.- С. 1165-1177.
9. Агалаков С.Е., Курчиков А.Р. Бабурин А.Н. Геолого-геофизические предпосылки существования газогидратов в туронских отложениях Восточно-Мессояхского месторождения // Геология и геофизика.- 2001.- Том 42, №11-12.- С. 1785-1791.
10. Dallimore S.R. and Collett T.S. (Eds.) Scientific results from the Mallik 2002 gas hydrate production research well program, Mackenzie Delta, Northern Territories, Canada.- Ottawa: Geological Survey of Canada (Bulletin 585). – 2005. – 140 p.
11. Волкова В.С., Архипов С.А., Бабушкин А.Е. и др. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кайнозой Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО».- 2002.- 246 с.
12. Николаев С. КИОТО: 10 лет спустя // Энергия.- 2008.- №5.- С. 42-48.
13. Advances in the geological storage of carbon dioxide. S. Lombardi, L.K. Altunina, S.E. Beaubien (Eds.). - NATO Science Series. - Berlin: Springer Publishing - 2006.- 362 p.
14. Chuvilin E.M., Petrakova S.Yu. Gureva O.M., Istomin V.A., Formation of carbon dioxide gas hydrates in freezing sediments and decomposition kinetics the hydrates formed // Physics and Chemistry of Ice. Proceedings of the 11th International Conference on the Physics and Chemistry of Ice. - The Royal Society of Chemistry, England. - 2007.- P. 147-154.

УДК 622.014.2: 550.835.41

Ядерно-геофизические технологии опробования руд в ТОО «Корпорация Казахмыс»

С.А. Ефименко¹, 8-71063-22276, glavgeof@kazakhmys.kz

В.С. Портнов², 8-7212-567862, umo@kstu.kz

¹ -ТОО «Корпорация Казахмыс», г. Жезказган, Казахстан

² – Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан

ТОО «Корпорация Казахмыс» (Kazakhmys LLC) включает четыре филиала: ПО «Жезказганцветмет», ПО «Балхашцветмет», ПО «Карагандацветмет» и ПО «Востокцветмет».

Жезказганское месторождение медистых песчаников, характеризующееся полиметаллическим характером оруденения (компоненты: основные - Cu, Pb, Zn; сопутствующие - Ag, Re, Cd, S); четырьмя технологическими сортами руд: медные сульфидные, комплексные (Cu – Pb, Cu – Pb – Zn), свинцовые (Pb, Pb – Zn, Zn) и смешанные (сульфидно – окисленные); горизонтальным залеганием рудных тел, являлось очень сложным объектом для внедрения ЯГФТОР. В настоящее время ЯГФТОР на горных и обогатительных предприятиях корпорации включают: рентгенорадиометрическое опробование руд по стенкам забоев, уступов, отбитой горной массы в навале;

рентгенорадиометрический анализ керновых, забойных, шпуровых, вагонных (ОТК), шламовых и технологических (ОФ) проб.

С появлением современных энергодисперсионных рентгенофлуоресцентных спектрометров (EDXRF) казахстанского производства: переносного РПП-12 и лабораторного РЛП-21 (производитель: ТОО «Физик», г. Алма-Ата), мониторинговые возможности ЯГФТОР выросли до уровня фактически полного охвата геологоразведочных и добычных работ на любом руднике и в экспресс-лаборатории любой обогатительной фабрики корпорации. Объектами ЯГФТОР стали в последнее время такие сложные, характеризующихся большим размахом содержаний всех промышленных и мешающих компонентов, полиметаллические месторождения, как: золото-медно-порфировое месторождение Нурказган (Cu, Au, Ag, Mo, Se, S), колчеданно-медно-свинцово-цинковые месторождения Кусмурын (Cu, Zn, Pb, Au, Ag, Cd, Se, Te, S) и Акбастау (Cu, Zn, Pb, Au, Ag, Cd, Se, S, Te), золото-колчеданно-медно-свинцово-цинковое месторождение Абыз (Pb, Zn, Cu, Au, Ag, S, Se, Te, Cd, In, Hg), Саякская группа медно-скарновых месторождений (Cu, Mo, Fe, Au, Ag, Bi, Te, Se, Re), медно-порфировое месторождение Шатырколь (Cu, Mo, Au, Ag, Te, Se, U), а также промпродукты на Балхашской, Нурказганской и Карагайлинской обогатительных фабриках, перерабатывающих руды этих месторождений.

Переносной полевой EDXRF спектрометр РПП-12 предназначен для проведения высокоточного многоэлементного рентгенорадиометрического опробования руд в естественном залегании (стенки горных выработок, уступы карьеров, естественные обнажения и т.д.), в отбитой горной массе и крупнодробленых пробах (руда в навале, штуфы, керн, пробы бурового шлама), а также для экспресс-анализа порошковых проб руд и горных пород в условиях полевых лабораторий на 4 элемента (Cu, Zn, Pb, Fe или Mn, Fe, Cu, Zn с радионуклидом Pu-238).

Интегрированный пакет прикладных программ – основное достоинство РПП-12: учет матричного эффекта; математические средства полного разделения наложенных линий элементов с соседними атомными номерами; учет взаимного влияния элементов; управление процессами накопления, отображения, обработки информации и вывода результатов обработки как на жидкокристаллическое табло (ТЖК) спектрометра, так и на внешние устройства компьютера. Несмотря на то, что в РПП-12 используется пропорциональный детектор излучений, никаких проблем с разделением линий элементов с соседними атомными номерами (CuKa и ZnKa, например) нет. Нет проблем и при определении массовых долей меди в рудах с очень высокими концентрациями железа. Следует особо подчеркнуть то обстоятельство, что переносной РПП-12 спектрометр, позволяющий проводить опробование высоких забоев и уступов до 7-8м. EDXRF спектрометры с PIN детектором носимые типа «пистолет»: InnovX Alpha series, X-MET 3000T, Niton XLt 800, РАЛ-3-02 и РАЛ-3-03, СРП-01 «Булур», СЕР-10Н «АЛДАН», МАРФ-002 могут быть использованы для опробования высоких забоев и уступов, но только в случае применения самоходных полков типа СП-18А.

Отличительные особенности РПП-12 по сравнению с EDXRF спектрометрами:

1. Заметно большая площадь засветки опробуемого объекта по сравнению со спектрометрами «пистолетного» типа с PIN детекторами ($15 \div 30 \text{ см}^2$ против $2 \div 3 \text{ см}^2$) и, как следствие, более высокие показатели точности и представительности ЯГФТОР.

2. Полное решение проблемы взаимного влияния элементов с соседними атомными номерами (Cu и Zn, например) и эффективный учет матричного эффекта по упрощенному варианту способа фундаментальных коэффициентов (на шлакоотвале Балхашского медьзавода РПП-12 уверенно определял $0,25 \div 1,0\%$ Cu на фоне очень «тяжелой» матрицы: $Pb \leq 20,0\%$, $Zn \leq 15,0\%$, $Fe \leq 45\%$), несмотря на использование пропорционального детектора излучений.

3. Возможность использования в качестве лабораторного спектрометра и гораздо больший срок службы пропорционального детектора, высокая «живучесть» спектрометра

(перезагрузка программного обеспечения в течение нескольких минут), что важно при работе на удаленных рудниках.

4. Наличие опции «блокировка работы прибора» в случае, если предварительная обязательная градуировка прошла не штатно.

Лабораторный EDXRF спектрометр РЛП-21 предназначен для проведения рентгенорадиометрического высокоточного анализа (РРА) на 34 элемента (Cu, Pb, Zn, Ag, Cd, Fe, As, Ba, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Ga, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Pd, In, Sn, Sb, Ta, Hg, Bi, W, U, Th) в истертых или прессованных пробах руд, горных пород, почв, продуктов обогатительных и металлургических производств; в отложениях на фильтрующих элементах и на пленках. РЛП-21 может найти применение в цветной и черной металлургии, экологии, других отраслях промышленности. РЛП-21 состоит из датчика, спектрометрического устройства (СУ), персонального компьютера и принтера. В датчике размещаются: СУ, блок возбуждения (4-6 изотопных источников америций-241), промежуточная мишень (Cs или Ba), блок управления, Si-Li ППД площадью 100мм², механизм перемещения турели с пробами, сосуд Дюара. Основные технические характеристики СУ: число каналов преобразований - 2048; постоянная времени - до 12 мкс.

РЛП-21 оснащён уникальным ПО, позволяющим реализовать: 4 режима обработки аппаратных спектров; высокоэффективный, точно рассчитанный под специфику решаемых аналитических задач, способ учета эффекта матрицы – метод фундаментальных коэффициентов (руды и промпродукты разные - градуировка одна); 3 метода расчета коэффициентов полиномиальной функции от содержаний определяемых элементов (обеспечивается оптимальный учет соотношения линий в K- и L-сериях при изменении вещественного состава руд); надежную методику идентификации аналитических линий элементов (по 14 параметрам с использованием всех линий K- и L-серий элементов); эффективный учет взаимного влияния элементов; визуальный (на экране монитора) контроль порядкового номера измеряемой пробы.

Технические характеристики РЛП-21: диапазон атомных номеров элементов: Z=19÷51 (по K-серии от калия до сурьмы), Z=52÷83 (по L-серии от теллура до висмута); диапазон измеряемых содержаний 0÷100%; максимальная величина энергетического разрешения ППД по линии 0,94 фДж (5,9 кэВ) при интегральной загрузке 10кГц, при которой гарантируются метрологические характеристики спектрометра, 250 эВ; излучение направляется на кювету снизу; экспозиция измерения: фиксированная - 415с, переменная - 100÷400с; средний срок службы 6 лет; габаритные размеры датчика 510x510x1000мм; масса датчика – 60кг; диаметр кюветы 40мм; число кювет в турели 10; время перемещения кюветы в зону облучения 5с.

Отличительные особенности РЛП-21 по сравнению с EDXRF спектрометрами данного класса:

1. РЛП-21 обладает универсальной методикой, позволяющей вести анализ по принципу «объекты анализа разные – градуировка одна» (таблица).

2. РЛП-21 рассчитан на определение низких (1 ÷ 10 ppm) массовых долей Ag, Cd и ряда других элементов. Он отлично работает на рудах месторождения Нурказган, содержащих в среднем 2,8 ppm Ag и 40,0 ppm Mo. Ни один EDXRF спектрометр на столь бедных рудах работать не может.

3. РЛП-21 без проблем справляется с тестом на государственном стандартном образце руды ГСО-3596, содержащем и As, и Pb, линии которых AsK α и PbL α имеют одинаковую энергию 10,5 кэВ: аттестованные содержания – C_{As} = 1,21%; C_{Pb} = 0,56%; фактические – C_{As} = 1,21%; C_{Pb} = 0,57%. Это подтверждает высокую эффективность работы идентификатора аналитических линий.

4. Тест на ГСО-3597 (C_{As} = 3,96%; C_{Pb} = 0%) также положителен: «ложной» аномалии свинца от мышьяка нет: C_{As} = 3,92%; C_{Pb} = 0,009%.

5. Точность РРА на РЛП-21 соответствует III категории точности (точность рядового химанализа) по ОСТ 41 – 08 – 205 – 04 для: Ag (в 19 ГСО); Zn (17); Pb (16); Cu и Fe (13); Cd (11); Ba (10); Sr (7); Se (6); Mn (5); As, In и Mo (4); Ni и Sb (3); Bi, Ga, Y, Rb, Nb, Th, U (1).

Прибор довольно уверенно определяет содержания Ag в ГСО 4822 ДВГ (0,40 г/т) и ГСО 8076 (0,67 г/т) при точности анализа по IV категории.

6. Пределы обнаружения элементов (рассчитаны по критерию 3σ): Ag 1,2 ppm (ГСО-3029; $C_{Ag} = 2,1$ ppm), Cd – 1,35 ppm (ГСО-4822 ДВГ; $C_{Cd} = 5,0$ ppm); Zn 0,0058% (ГСО-2887; $C_{Zn} = 0,011\%$), Pb 0,0084% (ГСО-2887; $C_{Pb} = 0,037\%$).

Таблица. Сходимость РРА на медь (РЛП-21 и химанализ) проб промпродуктов Жезказганской (ЖОФ), Сатпаевской (СОФ), Балхашской (БОФ) ОФ и Жезказганского медьзавода (ЖМЗ)

Промпродукт	Пред-прия-тие	Содержание, %				
		Cu		Pb	Zn	Fe
		х/а	РЛП-21	РЛП-21	РЛП-21	РЛП-21
Медный концентрат	ЖОФ	36,77	36,80	3,23	1,82	6,30
Медный концентрат	СОФ	25,75	25,91	9,33	13,34	5,96
Медный концентрат	БОФ	18,20	18,65	0,54	1,31	32,60
Медный концентрат	ЖМЗ	39,30	39,15	3,23	1,60	7,82
Отвальный шлак	ЖМЗ	0,44	0,45	2,18	3,02	14,42
Конвертерный шлак	ЖМЗ	9,13	9,45	16,35	4,60	24,86
Гранулы	ЖМЗ	36,27	36,09	3,52	2,23	9,59
Штейн	ЖМЗ	53,40	53,39	7,98	2,24	12,48
Анодный шлак	ЖМЗ	34,80	35,08	11,73	1,62	10,92
Оборот их цеха корок	ЖМЗ	16,30	16,18	20,17	3,61	15,86
Оборотная пыль	ЖМЗ	12,50	12,16	39,47	4,37	1,76

Спектрометр РЛП-21Т конструктивно отличается от РЛП-21: вместо радионуклидов Am-241 используется портативный рентгеновский моноблок (РТ); излучение направляется на кювету сверху; ППД с термоэлектрическим охлаждением; исполнение спектрометра – настольное, кюветы металлические, цельнотянутые, диаметром 25мм;.

Самый современный вариант РЛП-21Т работает на Нурказганской ОФ. Число определяемых элементов – 29: Cu, Pb, Zn, Fe, Mo, Ag, Cd, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Co, Ni, As, Se, Rb, Sr, Zr, Y, Nb, Pd, Sn, Sb, S, Ba, Ta, W, Bi (S пересчитывается по корреляции с Fe). Экспозиция измерений 220 с. Предел обнаружение Ag - 1,2 ppm.

Более ранняя модификация РЛП-21Т используется на рудниках Акбастау и Кусмурун в составе мобильного аналитического комплекса (дробилка щековая ДСА, истиратель ИВ-3б спектрометр РЛП-21Т). Спектрометр обеспечивает анализ проб руд на 25 элементов: Cu, Pb, Zn, Mo, Fe, Ba, Ca, S, K, Ti, Cr, Mn, Co, Ni, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ta, Bi, W. Аналогичные по аналитическим возможностям РЛП-21Т работают на Карагайлинской и Балхашской ОФ.

Уникальный вариант РЛП-21Т в настоящее время запускается на Нурказганской ОФ. Этот спектрометр позволит дополнительно определять содержания легких элементов (Al, Si, S) без использования вакуумной камеры или инертного газа. Анализ легких и остальных элементов разнесен по времени. Этот спектрометр – качественно новая страница в РФА (для информации: РЛП-21Т, внедренные в Жайреме в январе 2009 года, позволяют определять легкие элементы одновременно с остальными), планируется внедрение на Нурказганской ОФ.

Мониторинг вещественного состава руд и концентратов на спектрометрах РЛП-21 и РЛП-21Т многократно превышает возможности химического анализа, который в эпоху эскалации экономического кризиса для многих горных предприятий становится не по

карману, и становится источником дополнительной прибыли при экспортных операциях с рудой и концентратом в виде доплат за попутные металлы.

С помощью РЛП-21 и РЛП-21Т установлено присутствие: а) Мо в рудах месторождений Акбастау и Кусмурын; б) стронция (до 5,14%) и тантала в рудах и породах месторождения Таскура; в) иттербия в красноцветных (безрудных) породах месторождения Жезказган. Удалось вовремя вмешаться в процесс разведки месторождения Нурказган: выявить ложные аномалии меди в данных химического анализа керна скважин, вызванные присутствием марганца в рудах и некорректного применения химиками ускоренного трилонометрического метода.

Модификация РЛП-21ТА (РТ, жидкий азот) несколько лет работает в лаборатории АО «Жезказгангеология» на РРА проб керна разведочных скважин на 26 элементов.

Спектрометры РЛП-21 и РЛП-21Т обеспечили проведение точного РРА сложных, с большим размахом содержаний всех промышленных и мешающих компонентов, руд таких месторождений, как: Жезказган, Жаман-Айбат, Таскура, Нурказган, Кусмурын, Акбастау, Абыз, Саякская группа, Шатырколь, промпродукты Балхашской, Нурказганской и Карагайлинской обогатительных фабрик, перерабатывающих руды этих месторождений, разведываемых крупных месторождений Бошекуль и Актогай.

Внедрение ЯГФТОР значительно повысило информативность баз данных о содержаниях основных и сопутствующих компонентов в рудах на стадиях горного и обогатительного переделов, а также на стадии поисковых и геолого-разведочных работ. Появилась реальная возможность управления добычей (комплексная многофункциональная система рудоподготовки; подсистема непосредственного оперативного управления качеством добываемых руд на базе жесткого контроля за процессами добычи руд и металлов) и переработкой (система непосредственного оперативного регулирования переработки) руд не только по основным промышленным, но и по сопутствующим компонентам (по Ag и Cd). Фактически создана информационная база для комплексной переработки руд и промышленных отходов.

УДК 622.014.2: 550.835.41

Рентгенорадиометрическое опробование медно-колчеданных руд

С.А.Ефименко¹, 8-71063-22276, glavgeof@kazakhmys.kz

В.С.Портнов², 8-7212-567862, umo@kstu.kz

¹ -ТОО «Корпорация Казахмыс», г. Жезказган, Казахстан

² – Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан

С позиций возможности применения рентгенорадиометрического метода в качестве инструмента опробования, медноколчеданные руды представляют крайне сложный объект, прежде всего из-за большого размаха содержаний железа и серы, а также вкрапленной (от мелкой до густой) структуры оруденения. Поэтому процедура выбора типа EDXRF спектрометра оказалась нелегкой. Основными критериями выбора были: надежность в условиях длительной эксплуатации на удаленном объекте, оперативное сервисное сопровождение, простота технического обслуживания, высокие реальные метрологические характеристики спектрометра на сложных полиметаллических рудах.

Руды месторождения «50 лет Октября» относятся к сульфидному типу и представлены халькопирит-пиритовыми, халькопирит-пирит-пирротиновыми и пирротиновыми разностями. Медь является основным промышленным компонентом, цинк, серебро и кобальт - сопутствующими промышленными компонентами. ТОО «Копер Технолоджи» поставляет на обогатительную фабрику ТОО «Актюбинская медная компания»

руды с такими усредненными параметрами: медь – $0,7\div 3,0\%$, железо – до $39,4\%$, сера – до $48,0\%$, цинк – $0,20\%$ и выше.

Рынок переносных EDXRF спектрометров сейчас весьма насыщен. Распространены спектрометры энергии рентгеновского излучения с p-i-n детектором носимые типа «пистолет»: InnovX Alpha series (США), X-MET 3000T (Финляндия), Niton XLt 800 (Япония), РАЛ-3-02 и РАЛ-3-03 (ВНИИТФА, Москва, Россия), СРП-01 «Булур» (НПП «Элскорт», Москва, Россия), СЕР-10Н «АЛДАН» (НЦП «Аспект», Дубна, Россия), МАРФ-002 (НИЛ электроники рентгеновских приборов, Екатеринбург, Россия). Маркетинг фирм дальнего зарубежья (в особенности INNOV-X SYSTEMS) в России весьма агрессивен. Спектрометры с пропорциональным детектором излучений выпускает только ТОО «Физик».

Было принято во внимание, что спектрометров типа «пистолет» есть один существенный недостаток: малая площадь «пятна» на исследуемом образце, с которого идет информация на p-i-n детектор. Идеология опробования составов металлов и сплавов, у которых структура в любой точке образца строго выдержана, была автоматически перенесена на руды, у которых такого постоянства состава нет и в помине, что наглядно продемонстрировали Хворов П.В. (институт минералогии УрО РАН, г. Миасс) и Блинов И.А. (Южно-Уральский государственный университет, г. Миасс) на международной конференции Рудогенез-2008. Для повышения представительности опробования на спектрометрах «пистолетного» типа необходимо сгущать сеть опробования, что не всегда технически возможно. Геометрия измерений, реализованная в датчике спектрометра РПП-12, обеспечивает площадь «пятна» от 15 (один источник) до 30 (два источника) см² и в гораздо большей степени соответствует специфике распределения оруденения в полиметаллических рудах. Было принято во внимание фактор механической прочности спектрометра. В Жезказгане, например, пока удавалось вернуть в эксплуатацию все датчики, упавшие на почву забоев с высоты $5\div 8$ м (когда с кровли забоя начинают падать куски породы, то оператор на датчике бросает всё и убегает). Случаи восстановления спектрометров «пистолетного» типа, упавших даже с гораздо меньшей высоты, авторам не известны. В условиях карьеров необходимо проводить опробование уступов высотой до 10м и более. РПП-12 оснащен комплектом подъёмных штанг и кабелем длиной 12-14м, а спектрометры «пистолетного» типа имеют кабель длиной всего $1,5\div 3$ м. Важную роль в условиях развивающегося экономического кризиса играет и ценовой фактор: спектрометры с p-i-n детектором в $1,5\div 3$ раза дороже РПП-12. К тому же у ТОО «Физик» на высоком уровне организовано сервисное сопровождение, поэтому простой спектрометров при серьёзных авариях минимальны. Исходя из вышеперечисленных соображений, выбор был сделан в пользу спектрометра РПП-12. Делая этот выбор, мы осознавали риски, связанные с тем, что придётся определять относительно невысокие содержания меди на фоне очень больших массовых долей железа (пропорциональный детектор не разделяет полностью линии FeKa и CuKa, причем пик последней линии находится в подошве более мощного пика первой линии), но не без оснований рассчитывали на уникальные возможности мощного математического аппарата, заложенного в программном обеспечении РПП-12, и на положительный опыт многолетней эксплуатации спектрометров РПП-12 в геофизических службах ТОО «Корпорация Казахмыс».

Спектрометр РПП-12 предназначен для проведения высокоточного многоэлементного рентгенорадиометрического опробования руд в естественном залегании (стенки горных выработок, уступы карьеров, естественные обнажения и т.д.), в отбитой горной массе и крупнодробленых пробах (руда в навале, штуфы, керн, пробы бурового шлама), а также для экспресс-анализа порошковых проб руд и горных пород в условиях полевых лабораторий на 4 элемента (Cu, Zn, Pb, Fe с радионуклидом Pu-238; Mn, Fe, Cu, Zn с радионуклидом Fe-55).

РПП - 12 состоит из датчика, устройства регистрации и обработки (УРО) и комплекта подъёмных штанг. В датчике размещаются источники ионизирующего излучения ($1\div 2$ радионуклида Pu-238), пропорциональный детектор излучений СИ-13Р, предварительный усилитель, 1 аккумулятор. УРО включает: микропроцессор DS5002FP, анализатор импульсов

на 1024 канала преобразований, жидкокристаллический индикатор (ТЖК), клавиатуру, 3 аккумулятора, разъем R232 для подключения к компьютеру. Штанги обеспечивают подъем датчика на высоту до 8м.

Пакет прикладных программ - основное достоинство РПП-12: учет матричного эффекта по упрощенному варианту метода фундаментальных коэффициентов; математические средства полного разделения наложенных линий элементов с соседними атомными номерами; эффективный учет взаимного влияния элементов; управление процессами накопления, отображения, обработки информации и вывода результатов обработки как на ТЖК УРО, так и на внешние устройства компьютера.

РПП – 12 позволяет: разбивать массив точек наблюдений на группы (сечения опробования); выводить на ТЖК содержания элементов в каждой точке наблюдения и по сечению в среднем, а также техническую информацию; распечатывать результаты опробования в виде отчета с привязкой сечений к планам горных работ.

Технические характеристики РПП-12: диапазон атомных номеров элементов, анализируемых с использованием радионуклида плутоний-238, по: К-серии $Z=20\div38$, по L-серии $Z=46\div83$; диапазон измеряемых содержаний $0\div60\%$; относительное энергетическое разрешение детектора по линии 1,02фДж (6,4 кэВ) при интегральной загрузке 10кГц не более 20%; экспозиция измерения $10\div100$ с; средняя наработка на отказ не менее 1000ч; срок службы 6 лет; напряжение на детекторе 1200В (паспортная величина – 1800В, поэтому срок службы счетчика намного увеличивается); Ni-Mn аккумуляторы емкостью 2300 мА·ч; время непрерывной работы: датчика 14ч, УРО 20ч; масса блоков прибора: датчика 1,0 кг, УРО 0,5 кг. Спектрометр РПП-12 занесен в Государственный реестр средств измерительной техники Республики Казахстан.

В настоящее время в ТОО «Копер Технолоджи» и ТОО «Актюбинская медная компания» с помощью спектрометра РПП-12 производится опробование бурового шлама взрывных скважин карьера, руды в навалe на штабелях товарной руды, уступов и негабаритов в карьере, дробленных проб ОТК и проб медного концентрата.

УДК 622.014.2: 550.835.41

Математические аспекты программного обеспечения рентгенофлуоресцентного переносного спектрометра РПП-12

*С.А.Ефименко¹, 8-71063-22276, glavgeof@kazakhmys.kz
В.С.Портнов², 8-7212-567862, umo@kstu.kz*

¹ -ТОО «Корпорация Казахмыс», г. Жезказган, Казахстан

*² – Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда,
Казахстан*

Предметом данной работы являются математические аспекты программного обеспечения (ПО), обеспечившие высокие метрологические характеристики РПП-12. И в первую очередь - алгоритмы расчета концентраций элементов и многочисленных поправочных коэффициентов

Идеология математического аппарата ПО РПП-12 базируется на трех основных задачах, которые необходимо решить для нахождения концентраций определяемых элементов в исследуемом образце рентгенорадиометрическим методом [1]:

- а) предварительная энергетическая градуировка спектрометра;
- б) нахождение интенсивностей аналитических линий определяемых элементов;
- в) расчет по найденным интенсивностям концентраций определяемых элементов.

Энергетическая градуировка спектрометра производится на специальной пластине, в которой на подложку из металлического бериллия нанесены соединения железа ($FeK_{\alpha} = 6,4$ кэВ) и брома ($BrK_{\alpha} = 11,92$ кэВ) и сводится к установлению зависимостей

$$\begin{cases} E = C_1 + C_2 i \\ \sigma = \sqrt{C_3 + C_4 i} \end{cases}$$

Нахождение интенсивностей линий рентгеновских флюоресценций определяемых элементов осуществляется с помощью минимизации функции среднеквадратического отклонения вида:

$$\chi^2(p) = \frac{1}{n-m} \sum_i \frac{1}{Y(i)} [Y(i) - F(i, p)]^2 \quad (1)$$

где p - вектор искомых параметров, n - число обрабатываемых каналов, m - число искомых параметров, i - текущий номер канала, $Y(i)$ - интенсивность в i -ом канале, $F(i, p)$ - искомый функционал.

Расчет концентраций определяемых элементов по найденным интенсивностям можно осуществить с использованием двух методов: упрощенного и полного.

В упрощенном методе используется способ спектральных отношений:

$$C_i = F_i \frac{J'_i}{J'_s} = F_i b_i \quad (2)$$

Для полного расчета содержаний определяемых элементов выбрана математическая модель, учитывающая: а) эффекты селективного поглощения и подвозбуждения определяемыми элементами, б) эффекты подвозбуждения рассеянным излучением, в) наличие в возбуждающем спектре двух интенсивных линий. Для учета изменения геометрических условий измерений, а также массового коэффициента ослабления неопределяемыми элементами используется рассеянное излучение радидуклида $Pu-238$.

Выражение для расчета содержания определяемых элементов имеет вид:

$$C_i = F'_i \frac{J'_i}{J'_s} \frac{d\sigma}{\left(\frac{1}{1+a_i} + \frac{K_u}{d+a_i} \right) \cdot \left(1 + \sum_j h_{ij} C_j \right)}$$

где d , K_u , h_{ij} – константы; F_i и F'_i - калибровочные коэффициенты (подбираются экспериментально по результатам замеров градуировочных образцов);

$$d\sigma = \sum_j d\sigma'_j C_j + d\sigma_{Zn} \left(1 - \sum_j C_j \right),$$

$$a_i = \frac{\mu'_i{}^{np}}{\mu'_o{}^{np}} = \frac{\sum_j \mu'_j C_j + \mu'_{Zn} \left(1 - \sum_j C_j \right)}{\sum_j \mu_{U1j} C_j + \mu_{U1Zp} \left(1 - \sum_j C_j \right)}$$

Остановимся на алгоритмах расчета некоторых поправочных коэффициентов. Коэффициенты соотношения k_i основных линий К- и L-серий характеристического излучения определяемых элементов (Fe, Cu, Zn, Pb или Mn, Fe, Cu, Zn) с энергиями E_{i1} и E_{i2} (индекс «i1» имеют линии, используемые в качестве аналитических: по умолчанию – это K_{α} и L_{α} линии) рассчитываются из выражений:

для линий К – серии:

$$k_i = \frac{P_{K\beta 1}^i + P_{K\beta 2}^i}{P_{K\alpha 1}^i + P_{K\alpha 2}^i} \cdot \frac{\mu_{u1}^{np} + \mu_{i1}^{np}}{\mu_{u1}^{np} + \mu_{i2}^{np}}$$

для линий L – серии:

$$k_i = \frac{r_{LIII}^i \cdot \omega_{LIII}^i (P_{L\alpha 1}^i + P_{L\alpha 2}^i + P_{Ll}^i)}{r_{LII}^i \cdot \omega_{LII}^i [P_{L\beta 1}^i + 0.2(P_{L\beta 3}^i + P_{L\beta 4}^i)] + r_{LIII}^i \cdot \omega_{LIII}^i P_{L\beta 2}^i} \cdot \frac{\bar{\mu}_{i1}^{np} + \bar{\mu}_{i1}^{np}}{\bar{\mu}_{i1}^{np} + \bar{\mu}_{i2}^{np}}$$

где P – вероятность выхода соответствующих линий; $\bar{\mu}_{i1}^{np}$ и $\bar{\mu}_{i2}^{np}$ – массовые коэффициенты ослабления для пробы со средними для данного месторождения содержаниями и с учетом наполнителя Z_H ;

$$\bar{\mu}_{i1}^{np} = \sum_j \mu_{i1j} C_j^{cp} + \mu_{i1Z_H} (1 - \sum_j C_j^{cp})$$

$$\bar{\mu}_{i2}^{np} = \sum_j \mu_{i2j} C_j^{cp} + \mu_{i2Z_H} (1 - \sum_j C_j^{cp})$$

$$\mu_{i1}^{np} = t \mu_{i1}^{\bar{np}} = \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi} \mu_{i1}^{\bar{np}}, \quad \mu_{i2}^{np} = t \mu_{i2}^{\bar{np}}$$

$$r_{LIII}^i = \frac{S_{L3}^i - 1}{S_{L3}^i S_{L2}^i S_{L2}^i} + \frac{S_{L2}^i - 1}{S_{L2}^i S_{L2}^i} \cdot f_{2,3}^i + \frac{S_{L1}^i - 1}{S_{L1}^i} \cdot f_{1,3}^i + \frac{S_{L1}^i - 1}{S_{L1}^i} \cdot f_{1,2}^i f_{2,3}^i$$

$$r_{LII}^i = \frac{S_{L2}^i - 1}{S_{L2}^i S_{L2}^i} + \frac{S_{L1}^i - 1}{S_{L1}^i} \cdot f_{1,2}^i, \quad r_{LI}^i = \frac{S_{L1}^i - 1}{S_{L1}^i} \quad (3)$$

Для расчета коэффициентов полиномиальной функции q_i от содержаний четырех элементов ПО РПП-12 предусматривает использование трех методов: Плоскость 1, Плоскость 2 и Поверхность. В РПП-12 по умолчанию используется метод «Плоскость 2». Он базируется на следующих алгоритмах:

для линейной регрессии:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 \quad (4)$$

для квадратичной регрессии:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_1^2 + a_6 x_1 x_2 + a_7 x_1 x_3 + a_8 x_1 x_4 + a_9 x_2^2 + a_{10} x_1 x_3 + a_{11} x_2 x_4 + a_{12} x_3^2 + a_{13} x_3 x_4 + a_{14} x_4^2 \quad (5)$$

В выражении (3) присутствует 5 искомых параметров, а в уравнении (5) – 15. В общем случае, если обозначить число искомых параметров через k , а число испытаний $m \geq k$, то в соответствии с методом наименьших квадратов в случае (4) надо решить линейную систему уравнений $[A'A] \cdot [X] = [A'B]$, а в случае (5) – минимизировать величину $[AX - B] \cdot [AX - B]$ (где A' – транспонированная матрица).

Выражение (4) удобнее представить в виде матриц:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{31} & x_{41} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & x_{32} & x_{42} \\ 1 & x_{13} & x_{32} & x_{33} & x_{43} \\ 1 & x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}; \quad X = [a_0 \quad a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4]$$

Задавая значения четырех независимых параметров, например, некоторым случайным образом в области определения этих параметров, можно найти вектор искомых параметров X и определить значение функции Y .

Коэффициенты взаимных вкладов аналитических линий d_{ij} обеспечивают корректировку измеренных интенсивностей характеристических излучений элементов.

Система уравнений, корректирующих измеренные интенсивности характеристических линий, имеет вид:

$$\begin{cases} J'_1 = J_1 - d_{12}J_2 - d_{13}J_3 - d_{14}J_4 \\ J'_2 = J_2 - d_{21}J_1 - d_{23}J_3 - d_{24}J_4 \\ J'_3 = J_3 - d_{31}J_1 - d_{32}J_2 - d_{34}J_4 \\ J'_4 = J_4 - d_{41}J_1 - d_{42}J_2 - d_{43}J_3 \end{cases}$$

Здесь n для каждого члена может иметь вид из ряда ($n = 1, 2$).

Требуется найти корректирующую матрицу D :

$$\begin{bmatrix} d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & d_{34} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} \end{bmatrix}$$

Коэффициенты d_{si} обеспечивают корректировку измеренной интенсивности рассеянного излучения радионуклида.

Уравнение корректировки измеренной интенсивности рассеянного излучения радионуклида имеет вид:

$$J'_S = J_S - d_{S1}J_1^m - d_{S2}J_2^m - d_{S3}J_3^m - d_{S4}J_4^m J_{S\Phi}$$

Здесь m для каждого члена может иметь вид из ряда ($m = 1, 2$), $J_{S\Phi}$ – рассеянное излучение без пробы (оно определяется в первую очередь). Требуется найти корректирующий вектор $[d_{S1} \ d_{S2} \ d_{S3} \ d_{S4} \ d_{S\Phi}]$.

Массив массовых коэффициентов ослабления и рассеяния можно представить в виде следующей таблицы:

	$\mu'_1(Fe)$	$\mu'_2(Cu)$	$\mu'_3(Zn)$	$\mu'_4(Pb)$	μ_{a1}	$d\sigma'_{Zi}$
Z_H	μ'_{1ZH}	μ'_{2ZH}	μ'_{3ZH}	μ'_{4ZH}	μ_{a1ZH}	$d\sigma'_{ZH}$
$Z_1(Fe)$	μ'_{1Z1}	μ'_{2Z1}	μ'_{3Z1}	μ'_{4Z1}	μ_{a1Z1}	$d\sigma'_{Z1}$
$Z_2(Cu)$	μ'_{1Z2}	μ'_{2Z2}	μ'_{3Z2}	μ'_{4Z2}	μ_{a1Z2}	$d\sigma'_{Z2}$
$Z_3(Zn)$	μ'_{1Z3}	μ'_{2Z3}	μ'_{3Z3}	μ'_{4Z3}	μ_{a1Z3}	$d\sigma'_{Z3}$
$Z_4(Pb)$	μ'_{1Z4}	μ'_{2Z4}	μ'_{3Z4}	μ'_{4Z4}	μ_{a1Z4}	$d\sigma'_{Z4}$

где $\mu'_{ij} = t \cdot \mu_{ij}$; μ_{ij} – массовый коэффициент ослабления аналитической линии i – го элемента j – м элементом;

μ'_{1ZH} – массовый коэффициент ослабления линии FeKa элементом с $Z = Zn$,

μ'_{1Z1} – массовый коэффициент ослабления линии FeKa элементом Fe и т.д.;

$$d\sigma'_{Z1} = d\sigma_{Zi}^{HK} \cdot \xi^{HK} + d\sigma_{Z1}^K \cdot \xi^K$$

где константы ξ^{HK} и ξ^K вычисляются по формулам:

$$\xi^{HK} = \frac{1}{1 + t \cdot \frac{\bar{\mu}_{us}^{np}}{\bar{\mu}_{u1}^{np}}}; \quad \xi^K = \frac{1}{1 + t};$$

$$\bar{\mu}_{us} = \sum_j \mu_{usj} \cdot C_j^{cp} + \mu_{usZH} \cdot \left(1 - \sum_j C_j^{cp}\right),$$

где C_j^{cp} – среднее содержание определяемых элементов в анализируемых образцах;

μ_{usj} – массовый коэффициент ослабления некогерентно рассеянной линии возбуждающего излучения определяемыми элементами (для нахождения μ_{usj} сначала находится величина

$$E_s = \frac{E_{u1}}{1 + \frac{E_{u1}}{512} [1 - \cos(\varphi + \phi)]}$$

Коэффициенты d и K_u , входящие в окончательные формулы расчета концентраций элементов, находятся из выражений:

$$d = \frac{\bar{\mu}_{u2}^{ch}}{\bar{\mu}_{u1}^{cp}} = \frac{\sum_j \mu_{u2j} \cdot C_j^{cp} + \mu_{u2Zh} \cdot \left(1 + \sum_j C_j^{cp}\right)}{\sum_j \mu_{u1j} \cdot C_j^{cp} + \mu_{u1Zh} \cdot \left(1 + \sum_j C_j^{cp}\right)}$$

Если возбуждающим является характеристическое излучение К-серии, то:

$$K_u = \left(\frac{E_{u1}}{E_{u2}}\right)^3 \cdot \frac{P_{k\beta1}^m + P_{k\beta2}^m}{P_{ka1}^m + P_{ka2}^m},$$

где P^m – вероятность выхода характеристических линий элемента мишени или анода рентгеновской трубки.

Если возбуждающим является характеристическое излучение L-серии, то:

$$K_u = \frac{r_{LIII}^i \cdot \omega_{LIII}^i (P_{L\alpha1}^i + P_{L\alpha2}^i + P_{LI}^i)}{r_{LII}^i \cdot \omega_{LII}^i [P_{L\beta1}^i + 0,2(P_{L\beta3}^i + P_{L\beta4}^i)] + r_{LIII}^i \cdot \omega_{LIII}^i P_{L\beta2}^i}$$

Коэффициенты учета эффектов подвозбуждения h_{ij} (изначально считаем, что подвозбуждение есть, если возбуждаются аналитические линии) находятся из выражений: если подвозбуждающим является излучение К-серии, то:

$$h_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \frac{S_k^j - 1}{S_j^k} \cdot \omega_k^j \mu_{u1}^j \frac{\mu_j^i}{\mu_{u1}^i} \cdot \left[\frac{\sin \varphi}{\bar{\mu}_{u1}^{np}} \cdot \ln \left(1 + \frac{\bar{\mu}_{u1}^{np}}{\bar{\mu}_j^{np} \cdot \sin \varphi}\right) + \frac{\sin \psi}{\mu_i^{np}} \cdot \ln \left(1 + \frac{\bar{\mu}_i^{np}}{\bar{\mu}_j^{np} \cdot \sin \psi}\right) \right];$$

если подвозбуждающим является излучение L – серии, то:

$$h_{ij} = \frac{1}{2} \cdot (r_{LIII}^j \omega_{LIII}^j + r_{LII}^j \omega_{LII}^j + r_{LI}^j \omega_{LI}^j) \cdot \mu_{u1}^j \cdot \frac{\mu_j^i}{\mu_{u1}^i} \left[\frac{\sin \varphi}{\bar{\mu}_{u1}^{np}} \cdot \ln \left(1 + \frac{\bar{\mu}_{u1}^{np}}{\bar{\mu}_j^{np} \sin \varphi}\right) + \frac{\sin \psi}{\mu_i^{np}} \cdot \ln \left(1 + \frac{\bar{\mu}_i^{np}}{\bar{\mu}_o^{gh} \sin \psi}\right) \right]$$

Необходимо сформировать вектор $H(i) = (h_{12} \ h_{13} \ h_{14} \ h_{23} \ h_{34})$.

Коэффициент F_i и F_i' , определяющие точность расчета содержаний элементов (расчет возможен только в случае использования спектров, набранных на образцах с известными химическими анализами Cu, Pb, Zn, Fe) находятся из выражений (1) и (2), соответственно.

Расчеты всех коэффициентов производятся автоматически в соответствующих диалоговых окнах основной рабочей программы спектрометра РПП-12.

Предложенная модель математической обработки вторичных аппаратурных спектров в спектрометре РПП-12 позволила обеспечить высокий уровень точности определения содержаний Cu, Pb, Zn и Fe на самых сложных матрицах вещественного состава полиметаллических руд и шлаков металлургических производств на EDXRF спектрометре с пропорциональным детектором излучений, который под силу далеко не всем EDXRF спектрометрам с PIN детекторами.
