

УДК 550.83.04, 504.5.06

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ И МОНИТОРИНГА СЛАБО ПРОЯВЛЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБВОДНЕННОСТИ ГРУНТОВ В УПРУГИХ, ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ И ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ НА ПРИМЕРЕ ПЛОЩАДКИ КИР «БАЙКАЛ-1»

Шайторов В.Н., Ефремов М.В., Жолдыбаев А.К., Кушербаева Н.Н., Шульга М.В., Утегенова М.А.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Приведены результаты изучения геодинамически активных зон вблизи площадки Комплекса исследовательских реакторов (КИР) «Байкал-1» методами сейсморазведки (метод рефрагированных волн), электроразведки (вызванной поляризации) в комплексе с атмогеохимическими съёмками. Выявлена наиболее активная в геодинамическом плане зона вблизи юго-западной границы площадки КИР «Байкал-1», где установлены наиболее значимые изменения во времени газопроницаемости, упругих и геоэлектрических параметров. Показана эффективность мониторинга слабо проявленных геодинамических процессов и обводнённости грунтов по этим параметрам.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение гарантированной безопасности при эксплуатации объектов атомной отрасли, помимо радиационной составляющей, предусматривает разработку и применение технологий ранней и долгосрочной диагностики изменения природных сред (горные породы фундамента, водная и газовая среда, почва), возникающих под воздействием природных факторов, а также процессов жизненного цикла самих объектов атомной отрасли [1]. Даже в том случае, когда вероятность возникновения опасности, в частности сейсмической, невелика, если она реализуется, последствия от такого события могут стать катастрофическими для большой территории.

В [2–4] показано, что главными источниками техногенного воздействия на геологическую среду являются статические нагрузки с такими их основными факторами, как статическое давление и его колебания, изменения напряжённого состояния и гидрогеологических условий, изменение состава подземных вод. При этом в наибольшей степени снижение несущих свойств при повышении влажности происходит в суглинистых грунтах. Так, например, повышение относительной влажности суглинистых грунтов с 20 до 30% приводит к снижению значений модуля деформации с 100 до 40 МПа, то есть практически в 2 раза [4]. В [5] установлена зависимость электрического сопротивления горных пород от их напряжённого состояния и показано, что параметр электрического сопротивления является более чувствительным детектором изменения напряжённого состояния породы (изменяется до 100–200%), тогда как скорость продольных волн изменяется в меньшем диапазоне значений (не более чем на 5–7%). Однако из-за взаимосвязи модуля деформации и коэффициента Пуассона, использование последнего перспективно в качестве диагностического параметра состояния грунтов при усталостном разрушении. В [6] наиболее важными индикаторами изменения увлажнённости грунтов выступают их электрическое сопротивление

и поляризуемость. Физической основой для оценки изменения модуля деформации в зависимости от влажности по геофизическим данным является повышение относительной поляризуемости суглинистых грунтов по мере роста их увлажнённости [7].

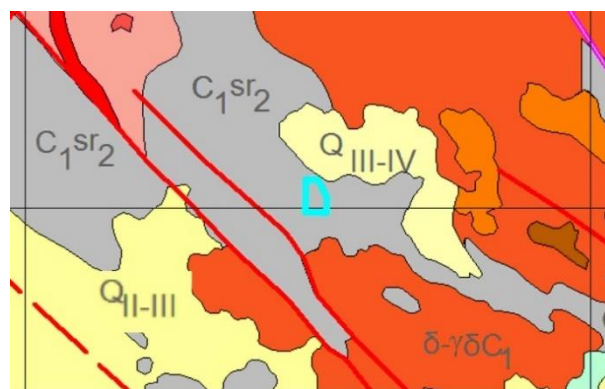
Таким образом, надёжными индикаторами изменения воздействия на здания и сооружения статического давления и его колебаний, напряжённого состояния и гидрогеологических условий, как основных действующих факторов, можно считать динамику геоэлектрических и упругих свойств несущих грунтов.

Целевым назначением исследований ставилась оценка информационных возможностей выявления и мониторинга слабо проявленных геодинамических процессов и изменения обводнённости грунтов в упругих, геоэлектрических параметрах и газопроницаемости на примере площадки КИР «Байкал-1».

Информационную основу для выполнения целевого задания составили данные полевых съёмок методами сейсморазведки, электроразведки и атмогеохимии, выполненных на территории, прилегающей к площадке КИР «Байкал-1», в период 2017–2019 гг. по одним и тем же профилям. Результаты этих исследований являются предметом рассмотрения в настоящей статье.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УЧАСТКЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно [8] в геологическом строении площадки КИР «Байкал-1» на изученную глубину 9,5 м участвуют четвертичные делювиально-пролювиальные и мезозойско-палеозойские элювиальные отложения. На большую глубину разрез сложен песчаниками, кремнистыми и углито-кремнистыми алевритами нижнего карбона C_1Sr_2 (рисунок 1-а). Тектоническая схема (рисунок 1-б), составленная по результатам дешифрирования космических изображений, свидетельствует о том, что площадка КИР «Байкал-1» находится в зоне действия регионального разлома (1) и локальных разломов (2 и 3), активность которых требует уточнения.



0 2 4 6 8 км

а) геологическая карта



0 0,4 0,8 1,2 км

б) тектоническая схема



1, 2 – делювиально-пролювиальные суглинки, супеси, щебни; 3 – песчаники, кремнистые и углисто-кремнистые алевролиты; 4 – гранодиориты; 5 – тектоническое нарушение: установленное (а) и предполагаемое (б); 6 – разлом по данным дешифрирования космоснимков: а – региональный (предположительно активный); б – локальный, в – предполагаемый локальный; 7 – изолинии рельефа дневной поверхности; 8 – контур площадки КИР «Байкал-1»

Рисунок 1. Площадки КИР «Байкал-1». Фрагменты геологической карты и тектонической схемы (по результатам дешифрирования космоснимков)

На территории, непосредственно прилегающей к КИР «Байкал-1» (рисунок 2), выполнены геофизические съёмки для изучения таких контролируемых параметров, как упругие, электрические и газопроницаемость. Измерения выполнены по двум ортогонально пересекающимся профилям (ПР1, ПР2) и включали: сейсморазведку методом рефрагированных волн (МРВ) – продольных и поперечных; электроразведку методом дипольного электрического зондирования (ДЭЗ-ВП); атмогеохимическую съёмку с измерением содержания CO_2 в почвенном воздухе.

МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ СЪЁМОК

Сейсморазведка МРВ выполнена с регистрацией первых вступлений продольных и поперечных волн. Возбуждение упругих колебаний, в соответствии с требованиями [9], осуществлялось установкой «падающий груз» (для продольных волн) и горизонтальными ударами кувалды (для поперечных волн). Регистратор – 48-канальная сейсмостанция SGD SL-48 (РФ). Шаг наблюдений по профилю – 5 м. По данным сейсмических наблюдений построены скоростные разрезы в параметрах продольной V_p и поперечной V_s скоростей.

Электроразведка методом ДЭЗ-ВП. Измерения электрического сопротивления и поляризуемости проведены с использованием генератора ГЭР-65W-500V и измерителя ВПФ-210-8к (РГП ИГИ-2015) с шагом 10 м. Погрешность измерений электрического сопротивления была не хуже $\pm 0,1\%$, поляризуемости – $\pm 0,02^\circ$. Обработка данных включала расчёт значений кажущегося электрического сопротивления (ρ_k) и фазового параметра поляризуемости (φ_{en}) по всем точкам измерения. Повышение достоверности оценки обводнённости разрезов обеспечивалось расчётом параметра относительной поляризации [10] путём нормирования измеренного фазового параметра на электрическое сопротивление. Эта процедура позволяла исключить влияние изменения электропроводности среды на измеряемую кажущуюся поляризуемость. По данным измерений построены геоэлектрические разрезы в параметрах электрического сопротивления ρ_k и относительной поляризуемости η^* . Относительная погрешность съёмки, оцененная по результатам контрольных измерений, составила не хуже $\pm 5\%$, что соответствует требованиям инструкции по электроразведке [11].



– контур территории реактора (ориентировочно);



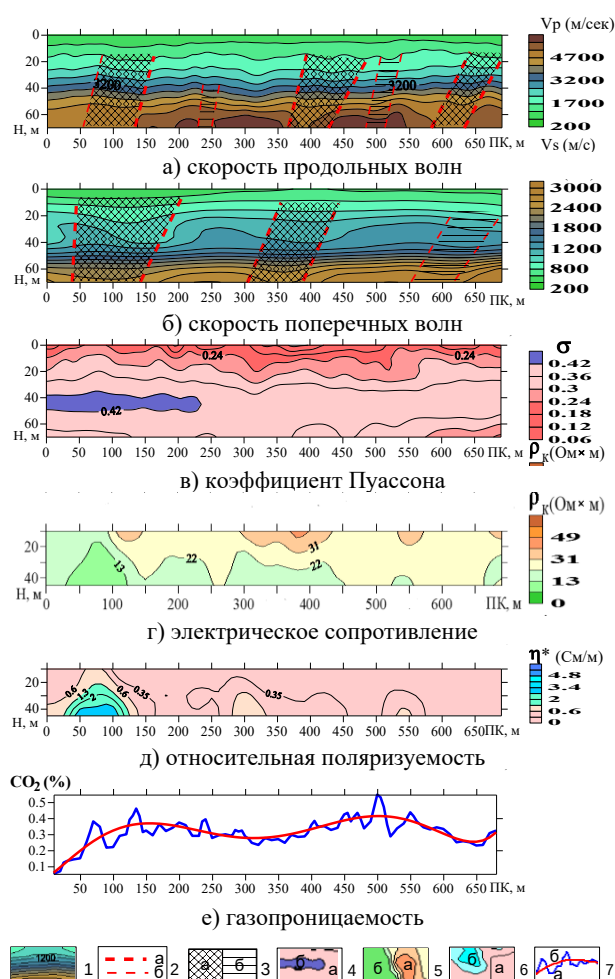
– геофизический профиль

Рисунок 2. Площадка КИР «Байкал-1». Система полевых наблюдений

Атмосферохимическая съёмка по CO_2 выполнена с шагом 5 м с измерением содержания углекислого газа в почвенном воздухе. Измерения выполнялись в предварительно пробуренных шпурах глубиной 0,6–0,8 м с использованием специального пробоотборника, соединённого газопроводящим шлангом с газоанализатором Dräger X-am 7000. Погрешность измерений согласно [12] была не хуже $\pm 20\%$ в диапазоне содержаний 0–5,0%. По результатам измерений построены графики содержаний CO_2 и дана оценка газопроницаемости грунтов по изученным профилям.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ СЪЁМОК

На рисунке 3 приведен пример результатов изучения сейсмических, электрических характеристик и газопроницаемости разреза по ПР1 (2017 г.).



1 – изолинии скорости продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн; 2 – тектоническое нарушение: а – уверенно выделенное, б – предполагаемое; 3 – зона трещиноватости: а – уверенно выделенная, б – предполагаемая; 4 – изолинии коэффициента Пуассона: а – с пониженным, б – с повышенным значением; 5 – изолинии кажущегося сопротивления ρ_k : а – с пониженным, б – с повышенным значениями; 6 – изолинии относительной поляризуемости η^* : а – фоновая, б – повышенная более стандартного отклонения от среднего значения $\phi_{ВП}$; 7 – содержание CO_2 в почвенном воздухе: а – наблюдаемое, б – тренд фоновых значений

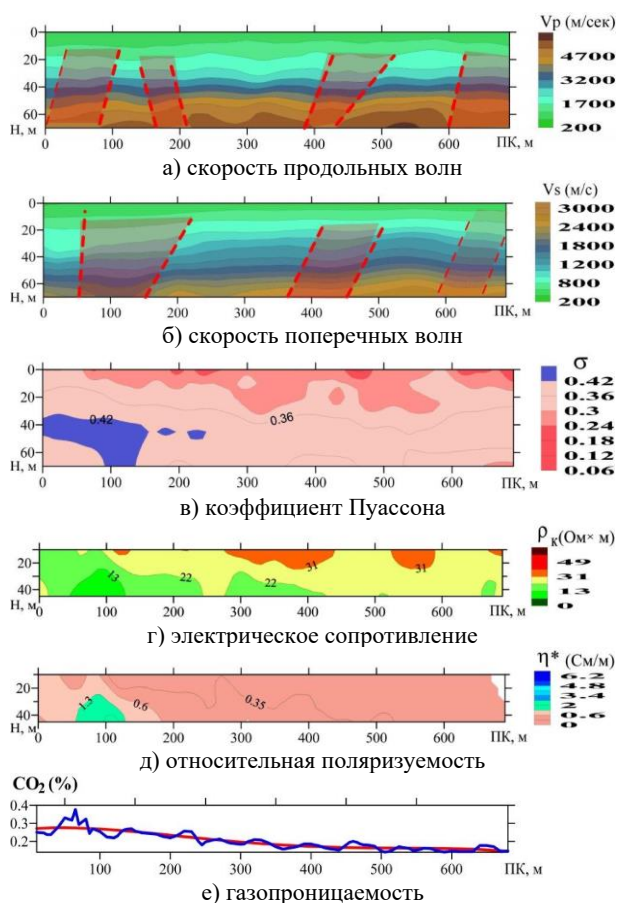
Рисунок 3. Площадка КИР «Байкал-1», ПР1. Результаты мониторинговых съёмок 2017 г.

По данным сейсморазведки (рисунок 3-а, б) подошва коры выветривания, выделяемая по максимальному градиенту скорости упругих волн, залегает на глубине порядка 45–50 м. Ниже залегающая часть разреза имеет блоковое строение с чередованием блоков с пониженными и повышенными значениями скорости упругих волн. При этом наиболее контрастные понижения скорости практически на всю глубину зондирования отмечены на флангах этого профиля (ПК 0–130 и ПК 550–620), что, наиболее вероятно, связано с проявлениями тектонически ослабленных тектонических трещин.

Оценить обводнённость разреза по распределению скоростей продольных и поперечных волн в отдельности практически невозможно. Более информативным в этом плане является распределение на глубину коэффициента Пуассона (рисунок 3-в). Значения этого параметра повышаются от 0,06 до 0,42 в интервале глубин 10–45 м и снижаются до 0,3–0,36 при увеличении глубины зондирования. Согласно [13], такие значения характерны для песчаников и алевролитов. При этом для песчаников экспериментально показано [14] существенное возрастание значений коэффициента Пуассона (до 82%) по мере увеличения их обводнённости. Эти сведения позволяют считать, что повышение значений коэффициента Пуассона в интервале глубин от 30 до 50–60 м вдоль всего профиля вполне вероятно вызвано повышенной увлажнённостью разреза, а максимальные значения этого параметра в интервале ПК 0–230 связаны с локальной водонасыщенной зоной на глубине 40–50 м. Аномально высокие значения электропроводности и относительной поляризуемости (рисунок 3-г, д) установлены в интервале ПК 25–100–120. При этом максимальные значения этих параметров, характерных для обводнённых пород, однозначно коррелируются с зонами трещиноватости, выделенными по значениям скорости продольных и поперечных волн, а также по повышенным значениям коэффициента Пуассона. Основной закономерностью распределения углекислого газа в почвенном воздухе по ПР1 является синусоидальный тренд, максимумы которого наблюдаются в районе ПК 150 и ПК 500. Первый из максимумов отражает повышенную газопроницаемость разреза в зоне трещиноватости в интервале пикетов 50–180, связь второго с выявленными трещинными структурами менее однозначна. Важным элементом распределения газопроницаемости по ПР1 является наличие струйных потоков углекислого газа в районе ПК 70, 140 и 500. В начале профиля (ПК 70, 140) аномалии вполне согласуются с данными сейсморазведки и электроразведки по зоне трещиноватости и отражают её наиболее газопроницаемые участки. Струйный поток в районе ПК 500 подтверждается лишь в предполагаемой зоне трещиноватости, выделенной по скорости продольных волн. По совокупности полученных данных и с учётом [15] геологический разрез на западном фланге

ПР1 (ПК 0–130) проинтерпретирован как сложенный преимущественно проницаемыми песчаниками и алевролитами с повышенной влажностью. Как следует из результатов космодешифрирования (рисунок 2), это может быть связано с прохождением профиля через оперение разлома, проходящего в непосредственной близости. Полученное распределение скоростных, геоэлектрических и атмогеохимических характеристик по ПР1 и ПР2 (июль 2017 г.) принято в качестве начальных исходных данных для стартовой модели изучаемого объекта.

Мониторинг регистрируемых параметров выполнен в 2019 г. Как следует из рисунка 4, наблюдаемые параметры в сравнении с 2017 г. претерпели существенные изменения. Из упругих параметров наиболее контрастно изменения проявились в коэффициенте Пуассона (рисунок 3-в), особенно в районе его максимальных значений – аномальная область по латерали уменьшилась, но проявилась практически на всю глубину зондирования.



условные обозначения – на рисунке 3

Рисунок 4. Площадка КИР «Байкал-1», ПР1. Результаты мониторинговых съёмок 2019 г.

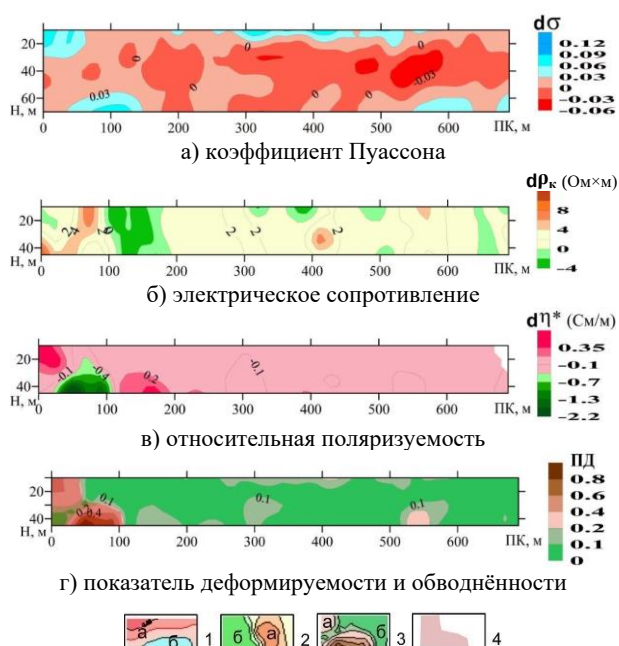
Из геоэлектрических параметров наибольшие изменения проявились по относительной поляризуемости (рисунок 4-д). Отмечено сокращение размеров аномальной зоны, ранее установленной в интервале

ПК 25–130, на 25 м с западной стороны и снижение максимальных значений относительной поляризуемости практически в 2 раза. Газопроницаемость по профилю в целом понизилась (рисунок 4-е), особенно в интервалах ПК 125–250 и ПК 400–625, где в 2017 г. были установлены протяжённые зоны с повышенным содержанием CO_2 в почвенном воздухе. Исключение составил интервал ПК 50–100, где газопроницаемость изменилась не существенно. Снижение газопроницаемости вполне удовлетворительно коррелируется с уменьшением проявленности в скоростных разрезах (вплоть до исчезновения) аномального снижения скорости продольных и поперечных волн, что наиболее характерно для интервала ПК 350–450.

На основании полученных данных сделан вывод о том, что наиболее активными в геодинамическом плане (с проявлениями активной гидродинамики) является часть разреза в интервале ПК 50–150, где произошли значимые изменения упругих, геоэлектрических параметров и газопроницаемости.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ЗОН И ОБВОДНЁНОСТИ ГРУНТОВ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Для оценки количественных изменений упругих и геоэлектрических свойств исследуемого разреза результаты мониторинга за период 2017–2019 гг. представлены в виде разрезов приращений наблюдаемых параметров (рисунок 5-а, б).



1–3 – изолинии положительных (а) и отрицательных (б) приращений: 1 – коэффициента Пуассона $d\sigma$, 2 – кажущегося сопротивления $d\rho_k$ и относительной поляризуемости $d\eta^*$; показателя деформируемости и обводнённости $d\Pi$; 4 – зона повышенной деформируемости и обводнённости; mean – среднее значение параметра

Рисунок 5. Площадка КИР «Байкал-1», ПР1. Моделирование геодинамически активных зон и обводнённости грунтов по геофизическим данным

Полученные данные свидетельствуют, что максимальной динамикой всех параметров характеризуется разрез в интервале ПК 0–200. При этом, если по коэффициенту Пуассона наиболее существенные изменения отмечаются только в самой верхней части разреза и на глубине более 55 м (рисунок 5-а), то по геоэлектрическим параметрам (рисунок 5-б, в) изменения охватывают практически весь интервал исследованных глубин. Характерной особенностью динамики этих параметров является её знакопеременный характер.

С использованием результатов геофизических мониторинговых наблюдений построена стартовая двумерная модель деформированности и обводнённости грунтов. Предварительно разномасштабные данные приводились к единому уровню путем расчёта их относительных значений в интервале от 0 до 1. Затем вычислялся интегральный параметр для используемых показателей, максимальное значение которого приводилось к 1. Результативный разрез представлялся в показателе деформируемости и обводнённости (рисунок 5-г). Как видно из полученной модели, наиболее контрастные изменения обводнённости и упругих характеристик на глубину не менее 35–45 м выявлены в зоне шириной порядка 100 м, расположенной на юго-западной границе ограждения комплекса «Байкал-1». Предполагается, что наиболее вероятной причиной выявленных изменений являются

геодинамика и деформационные процессы, которые вызвали перераспределение поровой влаги по геодинамически активным зонам, что сопровождалось снижением деформационных свойств грунтов. Последующие исследования геофизических параметров целесообразно продолжить в части оценки геоэкологической значимости выявленных аномальных эффектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования по оценке возможностей выявления и мониторинга слабо проявленных геодинамических процессов и изменения обводнённости грунтов по геофизическим данным на площадке КИР «Байкал-1» проведены на основе упругих, геоэлектрических параметров и газопроницаемости. Применение геолого-геофизических технологий показало эффективность наблюдательной сети и самих измерений для мониторинга деформационных процессов и обводнённости в осадочно-метаморфогенной толще, сложенной песчаниками и алевролитами.

Уточнено строение разреза на территории, прилегающей к КИР «Байкал-1». Выполненные исследования позволяют приступить к оценке геоэкологической значимости выявленных аномальных эффектов в геофизических параметрах для прогнозирования возникновения неустойчивого состояния площадки под воздействием природно-техногенных факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ядерная и радиационная безопасность. Технический регламент. Утв. приказом Министра энергетики РК от 20.02.2017 г. № 58 [Электронный ресурс] – <https://zakon.uchet.kz/rus/docs/V1700015007>
2. Изменение свойств грунтов под воздействием внешних факторов основные виды техногенного воздействия на грунты и их классификация: [Электронный ресурс] – Режим доступа свободный <http://zavantag.com/docs/index-16528031.html>
3. Пьянков, С. А. Механика грунтов : учебное пособие / С. А. Пьянков, З. К. Азизов. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – 169 с.
4. Рекомендации по методике прогноза изменения строительных свойств структурно-неустойчивых грунтов при подтоплении / ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1984. – 156 с.
5. Кузьмин, Ю.О. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород / Ю.О. Кузьмин, В.С. Жуков. – М.: Горная книга. – 2-е изд. стер., 2012. – 264 с.
6. Шарапанов, Н.Н. Методика геофизических исследований при гидрогеологических съёмках с целью мелиорации земель / Н.Н. Шарапанов, Г.Я. Черняк, В.А. Барон. – М.: Недра, 1974. – 176 с.
7. Рекомендации по методике прогноза изменения строительных свойств структурно-неустойчивых грунтов при подтоплении / ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1984. – 156 с.
8. Отчёт об инженерно-геологических условиях строительства комплекса сооружений хранилища отработанного топлива реактора БН-350 на площадке «Байкал-1» / отв. исполнитель Демин В.Н. – Фонды РГП ИГИ. – Курчатов, 1998.
9. РСН 66-87. Инженерные изыскания для строительства. Технические требования к производству геофизических работ. Сейсморазведка. Госстрой РСФСР. Дата актуализации: 01.02.2020.
10. Комаров, В.А. О природе электрических полей вызванной поляризации и возможностях их использования при поисках рудных месторождений / В.А. Комаров // Вестник Ленинградского гос. ун-та. Сер. геол. и геогр. – 1957, № 16. – С. 37–46.
11. Инструкция по электроразведке. Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка. – Ленинград: Недра, 1984. – 534 с.
12. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений / М-во геологии СССР. М.: Недра, 1983. – 191 с. Дата актуализации: 01.02.2020.
13. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / редакторы: Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протождяконова. – М.: Недра, 1975. – 279 с.
14. Машинский, Э.И. Затухание продольных и поперечных волн в частично и полнонасыщенных песчаниках-коллекторах под давлением / Э.И. Машинский, Н.А. Голиков // Технологии сейсморазведки. – 2012. – № 4, – С. 22–28 [Электронный ресурс] – Режим доступа свободный <http://ts.ipgg.nsc.ru>
15. Рыжов, А.А. Петрофизический подход к данным малоглубинной электроразведки / А.А. Рыжов, В.А. Шевнин, Д.А. Квон // Инженерная, угольная и рудная геофизика – 2015. Современное состояние и перспективы развития. 1-я международная научно-практическая конференция и выставка Евро-Азиатского геофизического общества, Сочи, 28.09–02.10.2015.

КИР «БАЙКАЛ-1» АЛАҒЫНЫҢ МЫСАЛЫНДА СЕРПІМДІ ГЕОЭЛЕКТРЛІК ПАРАМЕТРЛЕРДЕГІ ЖӘНЕ ГАЗ ӨТКІЗГІШТІКТЕГІ НАШАР КӨРІНГЕН ГЕОДИНАМИКАЛЫҚ ҮДЕРІСТЕР МЕН ТОПЫРАҚТЫҢ СУЛАНҒАНДЫҒЫН АНЫҚТАУ МҮМКІНДІГІН ЖӘНЕ МОНИТОРИНГІН БАҒАЛАУ

В.Н. Шайторов, М.В. Ефремов, А.К. Жолдыбаев, Н.Н. Кушербаева, М.В. Шульга, М.А. Утегенова

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

КИР «Байкал-1» алаңының маңындағы геодинамикалық белсенді аудандарды атмогеохимиялық түсірімдер кешенімен бірге сейсморлаумен (тойтарылмаған толқындар әдісі), электрбарлаумен (туындаған поляризация) зерделеу нәтижелері келтірілген. КИР «Байкал-1» алаңының оңтүстік батыс шекарасының маңы геодинамикалық тұрғыда ең белсенді аудан екендігі анықталды, онда газ өткізгіштің, серпімді және геоэлектрлік параметрлердегі уақытта неғұрлым маңызды өзгерістер анықталды. Осы параметрлер бойынша нашар көрінген геодинамикалық үдерістер мен топырақтың сүеткізгіштігі мониторингінің тиімділігі көрсетілген.

ASSESSMENT OF A POSSIBILITY TO IDENTIFY AND MONITOR WEAKLY MANIFESTED GEODYNAMIC PROCESSES AND WATER-BEARING NATURE OF THE SOIL IN ELASTIC AND GEOELECTRICAL PARAMETERS AND GAS PERMEABILITY EXEMPLIFIED BY RRC «BAIKAL-1» SITE

V.N. Shaytorov, M.V. Yefremov, A.K. Zholdybayev, N.N. Kusherbayeva, M.V. Shulga, M.A. Utenogova

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

The paper presents the results of study of geodynamically active zones in the vicinity of “Baikal-1” Research Reactors Complex (RRC) site using methods of seismic survey (method of refracted waves), electrical survey (induced polarization) in conjunction with atmogeochemical surveys. The most active zone in the context of geodynamics was detected in the vicinity of south-western border of RRC “Baikal-1” site, where the most significant changes were established in the time of gas permeability, elastic and geoelectric parameters. Based on these parameters the efficiency of monitoring of weakly manifested geodynamic processes and the water-bearing nature of the soil was shown.