

На правах рукописи



ШИГАЕВ Виталий Юрьевич

**РАЗВИТИЕ ГЕОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА
АНАЛИЗА ОКИСЛИТЕЛЬНО-
ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ И
ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОТЛОЖЕНИЙ
НАД МЕСТОРОЖДЕНИЯМИ НЕФТИ И ГАЗА**

1.6.9 – геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена на кафедре геофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Официальные оппоненты:

Куликов Виктор Александрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова;

Мельник Игорь Анатольевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор Отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета;

Поспеев Александр Валентинович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заместитель главного геофизика АО «Иркутское электроразведочное предприятие».

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», кафедра геофизики.

Защита состоится 29 апреля 2025 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 24.1.087.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), в конференц-зале.

Отзыв в двух экземплярах, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3
факс (8-383) 330-28-07,
e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/theses/d003-068-03/shigaev2024>

Автореферат разослан 26 февраля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.г.-м.н., доцент



Н.Н. Неведрова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – геоэлектрохимический метод анализа элементного состава отложений, перекрывающих месторождения нефти и газа, на предмет развития способов выявления аномальной концентрации подвижных и близких им по формам типоморфных многовалентных металлов Mn (2^+ , 4^+); Ti (3^+ , 4^+); Ni (2^+ , 3^+); V (3^+ , 4^+ , 5^+); Cu (1^+ , 2^+); Pb (2^+ , 4^+); Cr (2^+ , 3^+ , 4^+) и определения окислительно-восстановительных свойств отложений как показателей наличия месторождений углеводородов (УВ).

Актуальность. В настоящее время в нефтегазопроисковой электроразведке регистрация значительных изменений геоэлектрических свойств пород (удельного электрического сопротивления, поляризуемости и др.) в нефтегазоносных интервалах разреза возможна лишь в благоприятных условиях. В связи с этим существует острая необходимость включения в комплекс нефтегазопроисковых работ методов, основанных на изучении элементного состава и окислительно-восстановительных свойств горных пород. Для этого привлекается литогеохимический метод, который изучает валовое содержание элементов-индикаторов и физико-химические показатели пород. В силу малой контрастности валовой концентрации элементов-индикаторов и полигенностью аномальных параметров окислительно-восстановительных свойств достоверность поиска месторождений УВ зачастую остается неудовлетворительной.

Повысить достоверность поиска месторождений УВ позволяет привлечение в комплекс нефтегазопроисковых работ геоэлектрохимических способов, позволяющих получать как прямую, так и пограничную информацию. В частности, способ частичного извлечения металлов (ЧИМ) является источником информации по элементному составу отложений, перекрывающих залежи. Фиксируемые способом ЧИМ поверхностные кольцевые аномалии полей концентрации подвижной формы химических элементов указывают на возможную нефтегазоносность глубоко залегающих горных пород. Аномально высокое содержание тяжелых металлов в приповерхностных отложениях над месторождениями объясняется явлением струйных ореолов рассеяния – близвертикальной миграции подвижных форм химических элементов совместно с газовой фазой от залежи к поверхности [Путиков, Духанин, 1994]. В то же время авторами не учитывается взаимодействие мигрирующих УВ с минеральным составом перекрывающих отложений, приводящее к восстановлению окисных форм химических элементов с переменной валентностью за счет нарушения физико-химического равновесия. Кроме того, в способе ЧИМ отсутствует техническая

возможность определения концентрации катионных и анионных форм элементов-индикаторов, а зависимость электрохимического процесса от естественной влажности горных пород, особенно в области анода, создает трудности при практической реализации способа ЧИМ.

Таким образом, актуальность выполненного исследования определяется необходимостью развития технико-методической составляющей геоэлектрохимического метода анализа элементного состава отложений над месторождениями нефти и газа для выявления аномальной концентрации элементов-индикаторов, а также окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и водородного показателя (pH).

Цель исследования – повысить информативность и качество анализа элементного состава активизированных постоянным электрическим током образцов породы, а именно по распределению в перекрывающих отложениях элементов-индикаторов, Eh и pH определить потенциальную нефтегазоносность геологической структуры.

Научная проблема – развить геоэлектрохимический метод анализа элементного состава отложений, перекрывающих предполагаемые месторождения УВ, путем разработки и апробации новых способов и устройств исследования концентрации катионных и анионных форм элементов-индикаторов в подвижной форме, Eh и pH для определения потенциальной нефтегазоносности геологической структуры.

Научно-технические задачи:

1. Разработать геоэлектрохимический способ анализа элементного состава горных пород над предполагаемыми месторождениями нефти и газа и устройство, обеспечивающее его реализацию.

2. Разработать геоэлектрохимический способ анализа окислительно-восстановительной обстановки горных пород над предполагаемыми месторождениями нефти и газа и устройство, обеспечивающее его реализацию.

3. Адаптировать способ направленного суммирования предварительно нормированных относительно исходных значений концентрации каждого элемента-индикатора, Eh и pH в перекрывающих отложениях для расчета коэффициентов активизации постоянным электрическим током геохимических процессов в образцах.

4. Определить по поверхностным отложениям связь распределения аномальных параметров концентрации подвижных и близких им по формам химических элементов, Eh и pH с глубинами залегания и поперечными размерами структур с подтвержденной и предполагаемой нефтегазоносностью.

Методологические основы. Сложность изучения надпродуктивных отложений геоэлектрохимическим методом обусловлена малой

концентрацией микроэлементов в подвижной и слабозакрепленной формах и полигенностью аномальных параметров окислительно-восстановительных свойств горных пород, обусловленной естественной влажностью, присутствием гумусового органического вещества, сероводорода, йода, брома и другими факторами. Вместе с тем наличие УВ, мигрировавших из залежи, растворенного кислорода, многовалентных химических элементов, индивидуальное распределение рН и Eh контролируют эпигенетические изменения горных пород и нарушение физико-химического равновесия над месторождениями УВ.

С целью изучения эпигенетических изменений горных пород и нарушения физико-химического равновесия над месторождениями УВ разработаны специальные приемы изучения электрохимических и электрокинетических процессов, протекающих при пропускании через образцы горных пород электрического тока [Патент 2236314 РФ; Шигаев В.Ю., 2003, 2005б; Технология прогноза ..., 2005; Экспериментальное изучение ... , 2009; Шигаев В.Ю., Решетников, 2011; Шигаев В.Ю., 2012; Шигаев В.Ю., Волкова, Аверченкова, 2014; Шигаев В.Ю., Шигаев Ю.Г., Руднев, 2016].

Одним из важных приемов проведения полевых работ является одновременный отбор образцов (до 80-100 шт.) по изучаемой площади; их подготовка и проведение электрообработки; последующий полуколичественный спектральный анализ (ПКСА) исходных и обработанных электрическим током образцов для синхронного определения концентрации 10-12 элементов-индикаторов на аноде и катоде во всех пробах; проведение направленного суммирования предварительно нормированных относительно исходных значений концентрации каждого элемента, рН и Eh.

Методы исследования и фактический материал. В ходе разработки, проверки и применения новых геоэлектрохимических способов и устройств исследования элементного состава, Eh и рН выполнен отбор образцов шлама и керна по разрезу скважин, а также образцов поверхностных отложений по геоэлектрохимическим профилям.

Основной метод исследования – лабораторный эксперимент по определению концентрации элементов-индикаторов – Mn, V, Ti, Ni, Cu, Pb, Cr и др. методом ПКСА [Ельяшевич, 2014] и Eh, рН потенциометрическим методом [Кузнецов, 2001] в отобранных образцах до и после взаимодействия с постоянным электрическим током [Шигаев В.Ю., 2012], исследование работы геоэлектрохимического устройства [Патент РФ 47365] при различном количестве затраченного электричества для измерения концентрации элементов-индикаторов и Eh, рН образцов горных пород, размещенных в устройстве. Выполнен

сравнительный и сопоставительный анализ результатов измерения рН с результатами теоретических расчетов рН в прикатодном слое изучаемых образцов. Способом направленного суммирования, адаптированным для геоэлектрохимических работ, рассчитаны геоэлектрохимические коэффициенты активизации геохимических процессов постоянным электрическим током в образцах. Численными расчетами оценены ошибки определения концентрации элементов-индикаторов и E_h , рН путем сравнения данных основных и контрольных замеров [Большаков, 1983]. В результате статистического анализа получены: форма кривой плотности вероятности суммарной концентрации тяжелых металлов в образцах и коэффициенты корреляции между рассчитанными геоэлектрохимическими параметрами и глубинам залегания предполагаемых ловушек УВ, определенных по данным МОГТ. Непараметрическим статистическим методом установлены статистически значимые изменения рН в приэлектродных зонах разработанного устройства. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с известными публикациями.

Большая часть фактического материала получена при проверке разработанных геоэлектрохимических способов анализа на известных месторождениях УВ, расположенных в различных нефтегазоносных провинциях: Прикаспийской (Королевское и Таловское); Волго-Уральской (Алексеевское, Вольновское, Жирновское, Западно-Степное, Михалковское); Западно-Сибирской (Ивановское); Ферганской (Чангыр-Таш). На трех нефтегазоперспективных площадях Степновского сложного вала – Заветной и Западно-Грязнушинской (объекты I и II) – выполнены поисково-разведочные работы; на Петропавловской площади (северная бортовая зона Прикаспийской впадины) изучена зона гипергенеза. Общая протяженность геоэлектрохимических профилей составила 208 км, образцы горных пород отобраны на 475 пикетах. По разрезу скважин отобрано 129 образцов шлама и керна. Количество контрольных образцов составило 10 % от общего количества.

Высокая степень достоверности полученных результатов обеспечивается:

– представительностью исходных данных и их надежностью: анализируются результаты более 3500 спектральных анализов по 10–12 элементам каждый, реализованных с использованием сертифицированных спектрографов СП-28, и результаты более 1000 измерений E_h и рН в отобранных образцах с использованием сертифицированного рН-метра 410-й модели, укомплектованного малоразмерными комбинированными электродами ЭСК-10603;

– высоким уровнем методического и технического развития геоэлектрoхимического метода: использовались специально разработанные и запатентованные способы и конструктивно простые устройства, значительно снижающие материальные затраты на бурение и повышающие эффективность поисково-разведочных работ;

– внедрением разработанных способов в ОАО «Саратовнефтегеофизика» (акты о внедрении от 25.03.1997 г.); Саратовском филиале ПАО НК «РуссНефть» (акт о внедрении от 01.03.2021 г.); ООО «Тюменьгеоспектр» (акт о внедрении от 01.02.2022 г.).

Защищаемые результаты:

1. Геоэлектрoхимический способ анализа концентрации типоморфных многовалентных металлов Mn, Pb, V, Ni, Cu, Cr, Ti в образцах надпродуктивных отложений до и после пропускания тока и устройстве, обеспечивающее его реализацию. Аномальные значения их концентрации на аноде и катоде, обусловленные электролизом в образцах, служат дополнительным критерием в обоснование нефтегазоносности отложений.

2. Геоэлектрoхимический способ анализа окислительно-восстановительных характеристик в образцах надпродуктивных отложений до и после пропускания тока и устройстве, обеспечивающее его реализацию. Аномальные значения pH и Eh на катоде, обусловленные электролизом и электроосмотическим перемещением углеводов в образцах, служат дополнительным критерием в обоснование нефтегазоносности отложений.

3. Экспериментально обоснованные и апробированные на практике алгоритмы расчета геоэлектрoхимических коэффициентов, распределение аномальных значений которых в перекрывающих отложениях является критерием в обоснование нефтегазоносности отложений.

4. Реализация разработанных способов на ряде нефтегазовых месторождений и перспективных площадей в различных нефтегазоносных провинциях показывает, что при толщине перекрывающих отложений меньше ширины антиклинальной структуры распределение аномальных параметров имеет кольцевую форму, при соизмеримой толщине или толщине, больше ширины структуры, – распределение аномальных параметров сплошное или комбинированной формы.

Научная новизна:

1. Разработанный для локализации нефтегазоперспективных геологических структур с высокой степенью достоверности геоэлектрoхимический способ анализа элементного состава перекрывающих отложений [Патент РФ 2178189] основан на изучении

ранее не учитываемых аномальных значений концентрации катионных и анионных форм элементов-индикаторов (Mn, Pb, V, Ni, Cu, Cr, Ti) за счет перераспределения ионов металлов в образцах при электролизе.

2. Разработанный для локализации нефтегазоперспективных геологических структур с высокой степенью достоверности геоэлектрохимический способ анализа окислительно-восстановительной обстановки в перекрывающих отложениях [Патент РФ 2416115] основан на изучении ранее не учитываемых аномальных значений окислительно-восстановительных характеристик pH и Eh на катоде за счет электролиза и электроосмотического перемещения углеводов в образцах.

3. Разработаны оригинальные алгоритмы выявления и картирования «слабых» геоэлектрохимических аномалий с использованием адаптированного способа направленного суммирования предварительно нормированных относительно исходных значений концентрации каждого элемента-индикатора, Eh и pH в перекрывающих отложениях.

4. При опробовании разработанных геоэлектрохимических способов анализа, выполненном с привлечением результатов перераспределения подвижных форм микроэлементов, нарушения физико-химического равновесия в горных породах – Eh и pH под действием электрического тока, определены особенности распределения аномальных геоэлектрохимических параметров в зависимости от глубины залегания и поперечных размеров геологических структур.

Личный вклад. Для подтверждения наличия месторождений УВ, оконтуривания их границ и локализации нефтегазоперспективных геологических структур поставлены и решены задачи разработки: геоэлектрохимических способов анализа элементного состава горных пород [Патенты РФ 2178189, 2473928] и окислительно-восстановительной обстановки [Патент РФ 2416115] в надпродуктивных отложениях; устройств, обеспечивающих их реализацию [Патенты РФ 47365, 111295, 66066]; алгоритмов расчета коэффициентов активизации геохимических процессов постоянным электрическим током в образцах [Шигаев В.Ю., 2012]. Соискателем лично:

– обоснована необходимость определения концентрации элементов-индикаторов на аноде и катоде для учета катионных и анионных форм элементов-индикаторов;

– обоснована необходимость измерений Eh и pH на катоде, характеризующих слабощелочную среду над месторождениями УВ; исключена необходимость измерений на аноде, где происходит неинформативное для поиска УВ окисление образцов;

– установлено оптимальное количество электричества, затрачиваемое на проведение лабораторных экспериментов;

– обоснована и экспериментально подтверждена толщина приэлектродного слоя образцов 0,5 см, где происходят статистически значимые изменения значений концентрации элементов-индикаторов и Eh, рН;

– выполнено нормирование значений концентрации элементов-индикаторов и Eh и рН после пропускания тока на их исходные значения при расчете коэффициентов активизации геохимических процессов;

– определены особенности распределения аномальных геоэлектрохимических параметров в поверхностных отложениях в зависимости от глубины залегания и поперечных размеров геологических структур.

Способы и устройства опробованы на разных уровнях среза Алексеевского, Вольновского, Жирновского, Западно-Степного, Ивановского, Королевского, Михалковского, Таловского, Чангыр-Таш месторождений, использованы при комплексных нефтегазопроисковых исследованиях [Патент РФ 2337383, 2402049], в геоэкологии и инженерной геологии [Патент РФ 2236314]. Соискатель непосредственно участвовал в полевых исследованиях, лабораторных экспериментах, подготовке рукописей статей и патентов, личной монографии и монографии в соавторстве.

Теоретическая и практическая значимость:

Разработанный геоэлектрохимический способ анализа элементного состава горных пород над предполагаемыми нефтегазоносными объектами позволяет изучать концентрации подвижных форм элементов-индикаторов после пропускания тока. Достоинством разработанного способа является раздельное изучение аномальных значений концентрации катионных и анионных форм элементов-индикаторов за счет перераспределения форм микроэлементов под действием электрического тока. В частности устанавливается рост концентрации в прианодном и прикатодном пространствах за счет изменения степени окисления металлов с образованием комплексных соединений, имеющих суммарный отрицательный и положительный заряды. Их совместное использование, в отличие от анализа валовой концентрации металлов, способствует повышению достоверности подтверждения наличия месторождений УВ, оконтуривания их границ и локализации нефтегазоперспективных геологических структур.

За длительное геологическое время в перекрывающих отложениях фиксируются аномальные значения Eh и рН с образованием слабощелочной среды за счет «дыхания» залежи. Из-за окисляющего воздействия свободного кислорода (озона), серы, окислительных вод и др. слабощелочная среда становится нейтральной и мало пригодной для

поиска УВ. Разработанный геоэлектрохимический способ анализа окислительно-восстановительной характеристики горных пород над предполагаемыми нефтегазоносными объектами позволяет решить задачу их достоверной локализации за счет активизации процесса восстановления на катоде до значений, не достижимых в естественных условиях. Это обеспечивается электролизом и перемещением к катоду углеводородных флюидов в образце электроосмотическим потоком за счет вязкого трения. Предлагаемое и запатентованное для практической реализации способа конструктивно простое устройство дает возможность оперативно проводить измерения Eh и pH по всей длине исследуемого образца.

Дизъюнктивные нарушения, стратиграфические замещения и др. геологические причины смещают «дыхание» залежи в субвертикальном направлении, поэтому аномальные значения концентрации элементов-индикаторов и pH, Eh в перекрывающих отложениях формируются в общем случае под воздействием любой точки залежи, рассматриваемой как единый источник УВ. Направленное суммирование проводится по различным направлениям от источника УВ к точкам наблюдения по каждому микроэлементу в отдельности. Это позволяет ослабить влияние случайных помех, вызванных особенностями геологического строения, погрешностями аппаратуры, технологии определения элементного состава пород и др., на результаты и усилить за счет суммирования полезный сигнал.

На продуктивность геологических структур указывают коэффициенты активизации геохимических процессов постоянным электрическим током с аномальными параметрами, совпадающими в плане с контуром геологических объектов или их окаймляющими. Определяющим здесь является отношение значений аномальных параметров в контуре структур к фоновым значениям, превышающее 1,0 отн. ед. Это превышение является геоэлектрохимическим критерием нефтегазоносности.

Оконтуривание и локализация геологических объектов по признаку формы геоэлектрохимических аномалий способствуют значительному снижению затрат на бурение за счет выделения перспективных участков в ходе исследования.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 72 работы: 15 входят в перечень изданий, рекомендованных ВАК, девять патентов на изобретение и полезную модель, две монографии. Из них в Перечень рецензируемых научных изданий по категории K1 входят 11 работ.

Результаты исследования докладывались лично и получили одобрение специалистов на международных и всероссийских конференциях:

– на форуме по проблемам науки, техники и образования (2003 г.); конференции, посвященной памяти В.Е. Хаина (2011 г.) в г. Москва;

– конференции «Закономерности эволюции земной коры» (1996 г.); на 7-й геолого-геофизической конференции и выставке «Через интеграцию геонаук – к постижению гармонии недр» (2016 г.) в г. Санкт-Петербург;

– XXX студенческой конференции (1992 г.), VI Всероссийской школе-семинаре им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли (2013 г.), Всероссийской молодежной научной конференции «Трофимуковские чтения» (2013 г.), геофизическом семинаре в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (2015, 2021 гг.) в г. Новосибирск;

– на международных конференциях «Неклассическая геоэлектрика» (1995, 2000 гг.), второй республиканской научно-практической конференции (2001 г.), научно-практической региональной конференции «Стратегия развития минерально-сырьевого комплекса Приволжского и Южного федеральных округов на 2006-й и последующие годы» (2005 г.), межведомственной научной конференции «Геологические науки» (1999 г.), на 3 – 4 – 7-м Саратовском салонах изобретений, инноваций и инвестиций (2007, 2009, 2012 гг.), на Всероссийской научной конференции «Проблемы геоэкологии, экологической геологии и рационального природопользования» (2012 г.); на научной межведомственной конференции (2019 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Геологические науки» (2014 г.) в г. Саратов;

– в других регионах России: VI международной научно-практической конференции (Астрахань, 2007 г.), X международной научно-практической конференции «Геомодель», (Геленджик, 2008 г.), Всероссийской научно-технических конференциях (Пермь, 1993, 2008 гг.), VI международной научно-практической конференции «Наука России: цели и задачи» (Екатеринбург, 2017).

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 250 наименований. Объем диссертации составляет 280 страниц, включая 11 таблиц и 131 рисунок.

Благодарности. Диссертация выполнена на кафедре геофизики СГУ им. Н.Г. Чернышевского. При выполнении работы соискатель пользовался советами и рекомендациями д.г.-м.н. [О.П. Конценбина], д.ф.-м.н. [В.П. Губатенко], д.х.н. И.А. Казаринова, д.г.-м.н. А.Ю. Гужикова, к.г.-м.н.

Е.Н. Волковой, к.г.-м.н. Э.С. Шестакова, к.г.-м.н. Ю.Г. Шигаева. Без участия сотрудников ОАО «Саратовнефтегеофизика» [Л.М. Чикалина], С.В. Кожевникова, Б.А. Головина; ОАО «Саратовнефтегаз» Ю.И. Никитина; Саратовского Филиала ПАО НК «РуссНефть» С.Е. Мезикова; ООО «Тюменьгеоспектр» А.А. Захарова, К.А. Соколова; ПАО «Лукойл» [А.В. Липилина], Л.В. Ячменевой; НИИ геологии СГУ Павлицева В.П. и др. были бы невозможными проверка разработанных способов и их внедрение в производство. Соискатель благодарен д.ф.-м.н. академику РАН Г.С. Голицину (ИФА им. А.М. Обухова РАН); сотрудникам ИНГГ им. А.А. Трофимука СО РАН: д.т.н. академику РАН М.И. Эпову, д.ф.-м.н. члену - корреспонденту РАН В.Н. Глинских, д.т.н. И.Н. Ельцову, д.т.н. [В.С. Могилатову], д.т.н. В.М. Грузнову, д.т.н. А.К. Манштейну, д.г.-м.н. Н.О. Кожевникову, д.г.-м.н. Н.Н. Неvedровой, к.г.-м.н. В.В. Оленченко, В.И. Самойловой; д.г.-м.н. О.Ф. Путикову (Санкт-Петербургский горный университет), к.х.н. С.А. Вешеву и к.г.-м.н. Н.А. Ворошилову (ФГУНПП «Геологоразведка») за их советы и конструктивные замечания при написании работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Физико-химические основы геоэлектрохимического способа анализа элементного состава отложений

Наиболее близким в техническом отношении к разрабатываемому способу является способ частичного извлечения металлов (ЧИМ), основанный на электрическом возбуждении процессов электрохимического растворения твердой фазы горных пород, переносе ионов под действием тока, их накоплении в области питающих электродов – элементоприемников (**раздел 1.1**). Катод состоит из полиэтиленового сосуда, заполненного раствором кислоты, титанового стержня, пористой полупроницаемой мембраны. Кислота нужна для нейтрализации гидроксид-иона, препятствующего переносу катионов к катоду. Анодом в установке служат металлические стержни. Электроды питаются постоянным током от полевых станций. Станция ЧИМ-К, например, позволяет проводить полевые работы с 40 катодами, помещенными в гумусовый горизонт. Мощность станции 10 кВт, максимальный ток – 40 А. Несомненным достоинством ЧИМ является селективное извлечение подвижных форм элементов-индикаторов на катоде, отражающих нефтегазоносность геологических объектов. О нефтегазоносности судят по первой ветви годографа, характеризующей вторичные ореолы над месторождениями УВ, а расстояние от места накопления до искомого

геологического объекта определяют по времени их поступления, приравнивая время к глубинности исследований [Путиков, 2008].

Недостатки способа ЧИМ условно делятся на взаимосвязанные друг с другом методические и технические. Несовершенством способа является применение электрического тока большой силы, сложная конструкция элементоприемников, использование кислотных электролитов. Здесь логичными являются попытки зарубежных [Talapatra, 1986; Luo, 1993] и отечественных специалистов [Сенчина, Болячкин, Мирошникова, 2019.] использовать менее мощные источники тока, использование которых, однако, приводит к увеличению времени пропускания тока.

Не до конца решенным остается вопрос одновременного извлечения элементов-индикаторов на катоде и аноде. Важность извлечения анионных форм обусловлена входением катионов металлов в состав комплексных соединений – анионов. Отмеченные недостатки вместе с громоздкостью полевых установок привели в настоящее время к полному прекращению поисковых работ способом ЧИМ в России [Ворошилов, Алексеев, Штокаленко, 2018].

В Китае, Индии, Канаде и США этот вопрос решается путем изменения конструкции элементоприемников и состава электролитов, их заполняющих [Hoover, Smith, Leinza, 1995; Chinese CHIM ... , 2009; Collection and ... , 2014 и др.]. Однако зарубежные специалисты так и не смогли преодолеть недостатки, связанные с утечками электролита, пассивацией катодов, ограниченным извлечением комплексных соединений – анионов, сложностью подбора полупроницаемых мембран.

Исторически сложилось, что вместе с ЧИМ к геоэлектрохимическим способам изучения элементного состава горных пород относят: термомагнитный геохимический метод (ТМГМ), метод диффузионного извлечения металлов (МДИ), метод поисков по формам нахождения элементов в фульватно-гуматном комплексе почв (МПФ), в основе которых лежит изучение подвижных форм микроэлементов [Путиков, 2008; Ворошилов, Алексеев, Штокаленко, 2018 и др.]. Однако соискатель считает способы ТМГМ, МДИ, МПФ, скорее, усовершенствованным вариантом литогеохимического метода, так как они не связаны с электрохимическими процессами, протекающими в горных породах под действием электрических полей. В эту же группу входят способы, потенциально пригодные для поиска месторождений УВ: МАСФ – анализа сверхтонкой фракции [Колонских, Макарова, 2008]; МЕФФА – мультиэлементного анализа тонкой фракции размером 2–35 мкм [Патент РФ № 2651353]; NAMEG, исследующий наноразмерные металлы в земных газах [Nanoscale metals ... , 1997]; МОМЕО изучающий мобильные формы нахождения элементов в почвенных пробах [Wang, 1998]; МММ,

анализирующий мобильные ионы металлов в пробах рыхлого покрова [Vertical ionic ... , 2005; Mark, Fedikow, Bezys, 2012 и др.].

Таким образом, основные усилия исследователей при совершенствовании способа ЧИМ должны быть направлены на разработку методик, обеспечивающих одновременное извлечение элементов-индикаторов на катоде и аноде конструктивно простых геоэлектрохимических устройств. Извлечение должно проводиться при малом количестве затраченного электричества без использования кислотных и щелочных электролитов, заполняющих элементоприемники.

При разработке способа проводятся полевые и лабораторные эксперименты (**раздел 1.2**). Отбор проб шлама и керна выполняется по разрезу скважин, пробуренных в контуре и за контуром Западно-Степного, Чангыр-Таш месторождений УВ и нефтегазоперспективной Петропавловской площади с глубин от 0 до 800 м. Отбор проб поверхностных отложений ведется с глубины 0,4–0,5 м по системе геоэлектрохимических профилей, пересекающих выделенные по данным МОГТ локальные объекты (Королевское, Жирновское, Михалковское). Контрольные пробы составляют 10 % от общего объема. Расстояние между профилями равно 1 см в масштабе съемки, между пикетами – 0,5 см. Отобранные образцы массой 250–300 г пакетируются и отправляются на лабораторные исследования [Шигаев В.Ю., 1991; Шигаев В.Ю., Шигаев Ю.Г., 2002; Шигаев В.Ю., 2003].

В лаборатории проводится: отсев остатков растительности, ситование, квартование, измельчение до заданной крупности зерна (менее 0,05 мм) и насыщение дистиллированной водой в отношении 1:1 [Шигаев В.Ю., 2003]. Водонасыщение необходимо для нейтрализации зависимости подвижности ионов от естественной водонасыщенности, минерализации поровой влаги и пористости. Подготовленные образцы массой 65 г загружаются в разработанное геоэлектрохимическое устройство: пластмассовый стакан объёмом 90 см³ со встроенными трубками для отвода газов и графитовыми электродами на торцах для подвода к образцам постоянного электрического тока. Далее образцы подвергаются воздействию постоянного электрического тока. При прохождении электрического тока через образцы происходит электрохимическое извлечение элементов. Первыми извлекаются подвижные и слабозакрепленные, а затем труднорастворимые формы элементов. Количество электричества, затраченного на лабораторный эксперимент, увеличивается от 0 до 10 А·ч, плотность тока составляет 20 мА/см², напряженность электрического поля – 23 В/см. После пропускания тока из приэлектродных зон, толщиной 0,5 см, отбирается навеска массой 2 г на спектральный анализ для регистрации продуктов извлечения. В

устройстве не требуется подкисление поверхности катода, так как толщина отбираемого образца 0,5 см значительно превышает область пограничного диффузионного слоя толщиной $2 \cdot 10^{-3}$ см, где происходит образование нерастворимых гидроксидов тяжелых металлов [Вахитов, Смирнов, Фокин, 2015].

Результаты лабораторных экспериментов по определению содержания бария в образцах песчано-глинистых перекрывающих пород Западно-Степной площади, отобранных в скважинах глубиной 100 м, показывают (Рисунок 1), что при количестве затраченного электричества, (Q) не превышающего 0,125 А·ч, происходит увеличение содержания бария, за счет подвижной и слабозакрепленной форм [Шигаев В.Ю., 1994, 1996, 2012].

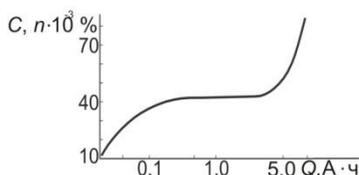


Рисунок 1 – Содержание бария под воздействием электрического тока в образцах песчано-глинистых пород Западно-Степной площади по результатам лабораторных экспериментов.

На годографе (см. Рисунок 1) видно, что в интервале Q от 0,125 до 2 А·ч отмечается часть кривой, параллельная оси абсцисс, которая указывает на отсутствие изменения концентрации бария в подвижной и слабозакрепленной формах. При увеличении Q более 2 А·ч наблюдается вторая восходящая ветвь годографа, характеризующая выход бария в сорбированной форме.

При разработке способа определяющим является выбор оптимального количества электричества для электрообработки образцов горных пород [Шигаев В.Ю., Шигаев Ю.Г., 2002; Шигаев В.Ю., 2003; Шигаев В.Ю., 2012]. С этой целью через образцы пропускается электрический ток силой 10, 100, 300 мА (раздел 1.3). До электрообработки, а также в ходе электрообработки через каждые 5 мин из приэлектродных участков отбираются навески для определения в них концентрации микроэлементов. По полученным данным строятся геоэлектрохимические годографы. Из их анализа следует, что ток силой 250 мА можно считать оптимальным.

Для определения времени пропускания электрического тока через образцы применяется однофакторный дисперсионный анализ [Арабаджи, 1978; Мартьянова, 2008]. По результатам анализа эффективный временной

интервал пропускания тока силой 250 мА для извлечения микроэлементов подвижной и слабозакрепленных форм составляет 40–45 мин, что соответствуют количеству пропущенного электричества, не превышающего 0,125 А·ч.

На примере экспериментов по образцам перекрывающих пород Королевского месторождения нефти оценивается качество экспериментальных данных по известной методике [Большаков, 1983]. В основных и контрольных образцах вычисляется средняя относительная ошибка определения концентрации, которая составляет: для V – 0,33, для Ni – 0,22, для Mn – 0,19, для Cu – 0,14, для Pb – 0,14, для всей совокупности элементов-индикаторов – 0,2. Следовательно, оптимальное сечение изолиний на картах или схемах распределения рассматриваемых величин по исследуемой площади составляет 1,0, что превышает трехкратную погрешность определения концентрации всей совокупности микроэлементов [Шигаев В.Ю., Шигаев Ю.Г., 2002], а экспериментально полученные данные – высокого качества.

Способ позволяет одновременно анализировать элементный состав катионных и анионных форм элементов-индикаторов, что способствует повышению достоверности поиска нефтегазоносных объектов в различных геологических условиях.

Таким образом, разработанный способ включает: отбор образцов, определение в них исходных концентраций элементов-индикаторов, воздействие на образцы постоянным электрическим током в геоэлектрохимическом устройстве, определение концентраций элементов-индикаторов в приэлектродных зонах устройства, локализацию нефтегазоперспективных объектов по распределению аномальных значений тяжелых металлов в породах перекрывающего комплекса.

Глава 2. Физико-химические основы геоэлектрохимического способа анализа окислительно-восстановительной обстановки

Изучение физико-химического равновесия над месторождениями УВ (раздел 2.1) началось в начале 80-х годов XIX в А.Н. Погылидиным и было впоследствии продолжено З. Балевой, С.Я. Вайнбаумом, Л.А. Гуляевой, В.П. Кереселидзе, С.М. Кисиной, А.А. Коржаневским, А.П. Лариной, А.В. Петуховым, А.В. Смирновым, Н.М. Страховым и др. В.Э. Левенсон назвал этот вид нефтегазопроисковых исследований «новым принципом разведки нефти». В ходе его реализации измерения ведутся в небольших объемах образцов или в их водных растворах для устранения зависимости Eh и pH от структурно-текстурных особенностей горных пород в естественном залегании. Разница в

результатах измерений рН при этом достигает 1,0 и более [In situ measurements ... , 2017].

По результатам замеров над месторождениями установлены низкие значения Eh и высокие значения рН [Минеральные новообразования ... , 2000; Напреев, Оленченко, 2010; Direct and indirect ... , 2020; и др.]. Аномалии обусловлены миграцией УВ, наличием в насыщающем водном растворе элементов с переменной валентностью и концентрацией растворенного кислорода [Левинсон, 1976]. Однако контрастность аномалий Eh и рН, как правило, низкая из-за полигенности изучаемых параметров [Карношина, Файер, Чочия, 1989; Шигаев В.Ю., Шигаев Ю.Г., 2002; Бредихин, Соболев, 2016; и др.].

В России основным способом изучения Eh и рН горных пород при поисках месторождений УВ является способ водной вытяжки [Воробьева, 1998]. Водные вытяжки готовятся путем добавления воды к навеске породы до соотношения 5:1, что ведет к растворению солей и минералов [Киргинцев, Трушников, Лаврентьева, 1972; Мельников, Прокофьев, Шатагин, 2008; Sangeeta, LaGraff, 2005; и др.]. Полученная суспензия перемешивается и отфильтровывается. Замеры рН проводятся сразу же после получения вытяжек, чтобы не допустить поглощение ими CO₂ из атмосферного воздуха, снижающее рН на 0,31 [Lahav, Morgan, Loewenthal, 2001].

Использование дистиллированной воды в качестве экстрагента, отсутствие необходимости в привлечении специального оборудования и дополнительной обработки образцов химическими реагентами является несомненным преимуществом способа. Плохая растворимость солей Mn, V, Ti, Ni, Cu, Pb, Cr и др., реакции ионного обмена между раствором солей и катионами поглощающего комплекса пород не позволяют определить истинные значения концентрации элементов-индикаторов и Eh и рН в породах, что является основным недостатком способа. Применяемые для повышения точности измерений центрифугирование [Characterization of water ... , 2015; Изучение состава ... , 2018], растворение пород кислотой [Патент РФ 2284556], нагрев проб [Out, Chiarizia, 2001; Аликберова, Рукк, 2011] одновременно ведут к уменьшению рН и снижают нефтегазопроисковые возможности способа.

За рубежом широкое применение получил способ определения Eh и рН в почвенных пастах, насыщенных водой. При приготовлении паст в породу добавляют количество воды из соотношения 1:1, которое позволяет получить фильтрат с помощью обычного оборудования [Soil Salinity Using ... , 2005; Aboukila, Abdelaty, 2017]. Это не нарушает химическое равновесие, свойственное горной породе в природных условиях [Химический анализ ... , 2012] и является основным

достоинством способа. Однако повышенная трудоемкость, длительное время приготовления образцов (4–6 часов), необходимость визуального контроля насыщения дистиллированной водой образца большой массы снижают эффективность нефтегазопроисловых работ.

В ходе измерений Eh и pH в водных вытяжках или пастах необходимо учитывать суспензионный эффект, заключающийся в различии измеренных значений pH в суспензии и в ультрафильтрате той же суспензии. Причина возникновения эффекта заключается в наличии противоионов в растворе, которые в случае разделения жидкой и твердой фаз уходят совместно с частицами дисперсной фазы [Воробьева, 1998; Guidelines for potentiometric ... , 2007; Водяницкий, Минеев, 2016; и др.].

Таким образом, результаты обзора указывают на необходимость дальнейшего развития способов изучения окислительно-восстановительных свойств образцов пород, обеспечивающих получение контрастного градиента значений Eh и pH над потенциальными месторождениями нефти и газа.

По мнению ряда исследователей [Перельман, 1975; Левинсон, 1976; Киреева, 2016; и др.] одним из главных факторов возникновения и существования зон эпигенеза над месторождениями УВ являются концентрированный растворенный кислород и химические элементы с переменной валентностью (**раздел 2.2**). Интересно, что при окислении мигрирующих УВ в приповерхностных условиях свободным кислородом (озоном) образуются смолы и асфальтены [Соколов, 1956], закономерное влияние которых на результаты измерений Eh и pH в образцах проявляется в ходе электроосмоса и электрофореза после пропускания тока [Королев, 2015].

При разработке способа (**раздел 2.3**) проводились полевые и лабораторные исследования по методике, описанной в главе 1. В ходе лабораторного эксперимента оценивается влияние постоянного электрического тока на изменение pH и Eh горных пород. Для проведения эксперимента разработано и запатентовано геоэлектрохимическое устройство [Патент РФ, № 47365], в которое загружается образец объемом 255 см³. На образец воздействуют постоянным электрическим током силой 250 мА в течение 40–45 мин, плотность тока составляет 16 мА/см², напряженность электрического поля – 23 В/см. Замеры pH и Eh проводятся потенциометрическим методом с использованием сертифицированного pH-метра 410-й модели, укомплектованного малоразмерными комбинированными электродами ЭСК-10603.

Выбор оптимального количества электричества для проведения лабораторных экспериментов выполнен по поверхностным отложениям Алексеевско-Заветной площади. Замеры pH последовательно проводились

в разработанном устройстве до электрического воздействия в исходных образцах ($pH_{исх}$), а также после 20, 40, 60 и 90 минут пропускания тока ($pH_{ток}$) непосредственно на катоде, аноде и на различном удалении от катода. Из анализа замеренных значений pH непараметрическими статистическими методами [Боровиков, 2003] следует, что после пропускания тока силой 250 мА статистически значимые изменения отношения $pH_{ток}/pH_{исх}$ фиксируются только в приэлектродных частях устройства по истечении первых 45 мин эксперимента [Шигаев В.Ю., 2009а, 2012, 2014; и др.]. Для дальнейшего анализа выбирались значения pH , Eh на катоде, где фиксируется крайняя степень восстановления образцов. При этом суспензионный эффект на катоде приводит к смещению физико-химического равновесия в кислотную область, а значения pH снижаются от 13,04 в ходе замеров в образцах до 12,64 в ходе замеров в фильтрах. Это указывает на меньшую информативность фильтратов в ходе оценки окислительно-восстановительных свойств пород, формирующихся на путях миграции УВ.

Средняя квадратическая ошибка определения pH рассчитывается по методике [Большаков, 1983] и не превышает 0,37. Относительная ошибка для всей совокупности замеров pH составляет 0,05 отн. ед., что говорит о высокой точности результатов эксперимента и является основанием для выбора оптимального сечения изолиний на картах или схемах распределения pH , которое с учетом трехкратной относительной ошибки составляет не менее 0,15.

Способ позволяет устранить окислительное воздействие кислорода, серы, углерода, азота и др. на перекрывающие отложения за счет электролиза на катоде и усилить тем самым восстановительное воздействие УВ.

Итак, разработанный способ включает: отбор образцов, определение в них исходных значений pH и Eh , воздействие на образцы постоянным электрическим током в геоэлектрохимическом устройстве, определение значений pH и Eh в прикатодной зоне устройства, локализацию нефтегазоперспективных объектов по распределению аномальных значений pH и Eh в породах перекрывающего комплекса.

Глава 3. Алгоритмы расчета коэффициентов активизации геохимических процессов постоянным электрическим током

Оконтуривание месторождений УВ по результатам распределения в перекрывающих отложениях pH и Eh [Вассерман, Каримова, Швыдкий, 2009; Кислухин, Кислухин, Бородкин, 2011; Криночкин, 2015; и др.], валовой концентрации элементов-индикаторов [Серебрянникова, 2008;

Сунгатуллин, 2010; Жилин, Лебединских, 2018; и др.] либо исключение из рассмотрения водорастворимых соединений [Патент РФ, № 2284556] не эффективно из-за низкой контрастности выявленных аномалий или их практического отсутствия [Шигаев В.Ю., 2003, 2009б, 2014 и др.].

Дополнительную поисковую информацию дают результаты геофизических и геохимических работ, свидетельствующие о формировании в перекрывающих отложениях эпигенетических ореолов рассеяния неуглеводородного характера [Аномальный геохимический эффект ..., 1990; Шигаев В.Ю., Шигаев Ю.Г., 1991; Фурсов, 1995; и др.].

Механизм образования неуглеводородных аномалий над залежами УВ (**раздел 3.1.**) объясняется физическими, химическими и биохимическими факторами [Закономерности формирования ... , 1978; Аномальный геохимический ... , 1990; Путиков, 2008; Фурсов, 2015; и др.]. Каких бы взглядов не придерживался соискатель, основной причиной изменчивости геофизических, геохимических, биогеохимических полей над залежами УВ являются: миграция УВ в перекрывающие отложения, наличие градиентов температуры, давления, механических напряжений горных пород, называемые многими исследователями «дыханием» залежи [Уткин, 1997; Газовое дыхание ... , 2000; Комплекс электромагнитных ... , 2014; и др.].

Внедрение в практику нефтегазописковых работ геоэлектрохимических способов ЧИМ, ТМГМ, МДИ, МПФ, изучающих элементный состав перекрывающих отложений, не приводит к резкому повышению эффективности работ из-за прямого переноса способов поиска рудных объектов в нефтегазописковую геологию. Не всегда способствуют успешному поиску УВ математические способы выделения «слабых» аномалий [Лукашев, 2010; Ворошилов, 2011; Zuo, 2014; и др.], по-прежнему анализирующие валовые концентрации элементов-индикаторов, слабо зависящие от углеводородонасыщения пород.

Достоверность получаемой информации повышается с включением в расчеты концентрации подвижных форм элементов и рН, Eh после электрообработки. Этот вопрос решается путем адаптации известного способа направленного суммирования [Рыскин, Сокулина, 2006; Абраменков, Ступина, Кулаков, 2020; Яблоков, 2021; и др.] к данным лабораторных экспериментов (**раздел 3.2.**). Направленное суммирование проводится избирательно по каждому элементу-индикатору отдельно в различных направлениях от точек наблюдения на дневной поверхности к источнику мигрировавших УВ и включает расчет геоэлектрохимических коэффициентов активизации геохимических процессов в образцах постоянным электрическим током. Это позволяет

ослабить влияние случайных помех, вызванных особенностями геологического строения, погрешностями аппаратуры, технологии определения элементного состава пород и др., на результаты и усилить за счет суммирования полезный сигнал.

Разработанный алгоритм включает расчет относительных коэффициентов путем нормирования концентрации каждого элемента на аноде и катоде геоэлектрохимического устройства относительно исходной

концентрации: $\Delta U_a = \frac{C_{\text{ток}}^a}{C_{\text{исх}}}$ и $\Delta U_k = \frac{C_{\text{ток}}^k}{C_{\text{исх}}}$, где $C_{\text{исх}}$ – исходная

концентрация, $C_{\text{ток}}^a$ и $C_{\text{ток}}^k$ – концентрация микроэлементов на аноде и

катоде, ΔU_a и ΔU_k – относительные параметры на аноде и катоде

[Патент РФ № 2178189]. Затем проводится направленное суммирование относительных коэффициентов для всех элементов-индикаторов на

пикетах $\overline{\Delta U}_a = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_a}{n}$ и $\overline{\Delta U}_k = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_k}{n}$, где n – количество

микроэлементов на пикете.

Далее рассчитывается комплексный параметр $K_{\Pi} = \overline{\Delta U}_a \cdot \overline{\Delta U}_k$, являющийся коэффициентом активизации геохимических процессов (перераспределение форм химических элементов и изменение их валентных состояний) электрическим током [Шигаев В.Ю., 2003].

Значения $K_{\Pi} > 1$ свидетельствуют о наличии в породах подвижных форм микроэлементов, когда значения $K_{\Pi} \leq 1$ – об их отсутствии.

В ходе лабораторных экспериментов измерялись также окислительно-восстановительный потенциал и кислотно-щелочной параметр как до пропускания электрического тока $Eh_{\text{исх}}$ и $pH_{\text{исх}}$, так и

после пропускания электрического тока на катоде геоэлектрохимического устройства $Eh_{\text{ток}}^k$ и $pH_{\text{ток}}^k$ [Патент РФ № 2416115].

Использование параметров $Eh_{\text{ток}}^k$ и $pH_{\text{ток}}^k$ обосновывается максимальной степенью восстановления на катоде, что особенно важно учитывать при исследовании зон углеводородного насыщения, характеризующихся

слабощелочной средой. Далее рассчитываются относительные – $\left| \frac{pH_{\text{ток}}^k}{pH_{\text{исх}}} \right|$,

$\left| \frac{E_{\text{ТОК}}^{\text{K}}}{E_{\text{ИСХ}}^{\text{K}}} \right|$ и комплексный параметр, $K_{\text{ОВП}} = \left| \frac{pH_{\text{ТОК}}^{\text{K}} \cdot E_{\text{ТОК}}^{\text{K}}}{pH_{\text{ИСХ}}^{\text{K}} \cdot E_{\text{ИСХ}}^{\text{K}}} \right|$, который

является коэффициентом активизации геохимических (окислительно-восстановительных) процессов электрическим током [Шигаев В.Ю., 2009б, 2011а]. По абсолютной величине $K_{\text{ОВП}}$ больше 1,0 отн. ед., так как значения $E_{\text{ТОК}}^{\text{K}}$ и $pH_{\text{ТОК}}^{\text{K}}$ превышают значения $E_{\text{ИСХ}}^{\text{K}}$ и $pH_{\text{ИСХ}}^{\text{K}}$ из-за выделения на катоде ионов водорода.

Первоначальные попытки использовать в качестве геоэлектрохимических критериев нефтегазонасности (раздел 3.3.) распределение в перекрывающих отложениях геоэлектрохимических параметров $C_{\text{ТОК}}^{\text{a}}$, $C_{\text{ТОК}}^{\text{K}}$, ΔU_{a} , ΔU_{K} , $E_{\text{ТОК}}^{\text{K}}$, $pH_{\text{ТОК}}^{\text{K}}$ столкнулись с отсутствием четких и контрастных границ в пределах месторождений УВ [Шигаев В.Ю., Руднев, Шигаев Ю.Г., 2016]. Это снижает поисковую ценность их раздельного рассмотрения. Совместную интерпретацию при этом обеспечивает введение в интерпретационный процесс алгоритма расчета $K_{\text{П}}$ и $K_{\text{ОВП}}$

Так на Алексеевском месторождении значения $K_{\text{П}}$ и $K_{\text{ОВП}}$ с аномальными параметрами, совпадают в плане с контуром нефтеносности, а аномально высокие значения $K_{\text{П}}$ на пикетах 6 и 18 (контур нефтеносности) приурочены к градиентным зонам распределения $K_{\text{ОВП}}$ (Рисунок 2).

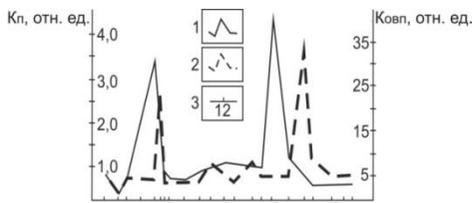


Рисунок 2 – Распределение геоэлектрохимических параметров в поверхностных отложениях Алексеевско-Заветной площади по результатам расчета: 1–кривая $K_{\text{ОВП}}$; 2–кривая $K_{\text{П}}$; 3–геоэлектрохимические пикеты.

Это указывает на связь концентрации элементов-индикаторов с нарушением физико-химического равновесия при воздействии постоянного тока на образцы горных пород [Шигаев В.Ю., 2011б].

Подтверждает сказанное также совпадение градиентных зон

геоэлектрохимических и геохимических аномалий на карте совместного распределения значений K_{Π} и суммарной концентрации тяжелых УВ.

Подобные результаты получены и на других месторождениях, например на Вольновском, где коэффициент контрастности – отношение значений K_{Π} и $K_{ОВП}$ в контуре и за контуром месторождений составляет 1,01–1,44 отн. ед. для K_{Π} и 1,38–2,44 отн. ед. для $K_{ОВП}$. На Алексеевском месторождении коэффициенты контрастности выше, чем на Вольновском. В любом случае отношение больше 1,0 отн. ед., что превышает трехкратную ошибку измерений, причем по параметру $K_{ОВП}$ – наиболее отчетливо.

Полученные результаты позволяют ввести в практику нефтегазопоисковых работ геоэлектрохимический критерий нефтегазоносности перспективных геологических структур. Наличие в перекрывающих отложениях геоэлектрохимических параметров с аномально высокими значениями, приуроченными к контуру структур, указывает на их перспективность. Показателем перспективности служит отношение значений геоэлектрохимических параметров в контуре структур к законтурным значениям, превышающее пороговое значение 1,0 отн. ед.

Таким образом, предложенные алгоритмы расчета коэффициентов активизации, являются новым практическим инструментом для выявления контрастных границ нефтегазоперспективных структур, не всегда фиксируемых по результатам литогеохимических нефтегазопоисковых работ.

Глава 4. Распределение аномальных геоэлектрохимических параметров над нефтегазоперспективными структурами

Первые общие представления о необходимости изучения совокупности геологических, геохимических и геофизических параметров, описывающих не только залежь УВ, но и след диффузионного потока дал в начале XX века В.И. Вернадский. Исследования Ф.А. Алексева, С.М. Аммосова, К.Б. Аширова, В.М. Березкина, К.С. Гумарова, Л.М. Зорькина, Е.В. Каруса, М.А. Киричек, А.Э. Конторовича, О.Л. Кузнецова, А.А. Кунарева, А.В. Сидоренко, В.А. Сидорова, С.С. Смирнова, В.В. Тикшаева, В.Ю. Шигаева, М.И. Эпова, А.С. Johnson, S.J. Pirson и др. подтвердили и развили идею В.И. Вернадского. Повысить достоверность поиска залежей УВ позволяет совместный анализ

геофизических данных и данных геоэлектрохимических способов изучения элементного состава во вторичных ореолах рассеяния.

Результаты применения разработанных способов хорошо согласуются с результатами термомагнитных, газогеохимических и сейсморазведочных работ (раздел 4.1). Так контур нефтеносности Алексеевского месторождения четко фиксируется по аномалиям повышенных значений комплексного параметра $K_{\text{ОВП}}$ и относительной магнитной восприимчивости k_t . Интересно, что градиентные зоны распределения $K_{\text{ОВП}}$ и k_t приходятся на участки повышенного содержания бутана, что указывает на их связь с нарушением физико-химического равновесия под влиянием УВ, мигрирующих из залежи [Рациональное комплексирование ... , 2010; Шигаев В.Ю., Решетников, 2011; Шигаев В.Ю., 2011б]. К тому же, на объекте I Западно-Грязнушинской площади на уровне целевых нефтегазоперспективных горизонтов выявлено совпадение аномально высоких значений комплексного параметра $K_{\text{П}}$ и значений эффективного сечения обратного рассеяния, полученного по результатам сейсморазведки МОГТ [Технология прогноза ... , 2005].

Результаты проверки разработанных геоэлектрохимических способов анализа на известных месторождениях УВ (раздел 4.2) позволяют сформировать геоэлектрохимическую прогнозно-поисковую модель (ГППМ) залежей УВ [Шигаев В.Ю., 2014]. Составной частью ГППМ являются карты и графики распределения относительных и комплексного геоэлектрохимических параметров. Сравнительный анализ карт и графиков на перспективных участках с картами и графиками на известных месторождениях реализует базовые принципы стадийности, адаптации и аналогии в ходе поисково-разведочных работ [Никитин, Хмелевской, 2004].

Разработанные способы проверены на месторождениях Прикаспийской (Королевское и Таловское); Волго-Уральской (Алексеевское, Вольновское, Жирновское, Западно-Степное Михалковское); Западно-Сибирской (Ивановское); Ферганской (Чангыр-Таш) нефтегазоносных провинций. Проверка выполнена на разных уровнях среза в различных геолого-тектонических, ландшафтно-геохимических и климатических условиях месторождений.

По результатам лабораторных экспериментов в образцах шлама и керна над месторождениями Чангыр-Таш (Ферганская впадина) и Западно-Степное (Бузулукская впадина) установлены аномальные зоны повышенных (от 1,2 до 10 отн. ед.) значений относительного геоэлектрохимического параметра ΔU для V, Ni, Pb, Mn, Cu, Zn, Ti, Cr и др. элементов-индикаторов, отсутствующие в скважинах за пределами

месторождений. На Петропавловской площади (внутренняя бортовая зона Прикаспийской впадины) по профилю из четырех скважин выявлены субвертикальные струи миграции микроэлементов в подвижной форме. Например, концентрация Mn в струях возрастает от $5 \cdot 10^{-3} \%$ до $15 \cdot 10^{-3} \%$ с максимумом в западной части профиля.

На Ивановском месторождении (Танловский мегавал) оценивалось распределение в образцах: $Eh_{исх}$, $pH_{исх}$, $Eh_{ток}^k$, $pH_{ток}^k$ и $K_{овп}$ по стволу внутриконтурной скв. Главным результатом экспериментов является увеличение $K_{овп}$ перед входом в продуктивный пласт от 4,5 до 18 отн. ед.

Завершающим этапом проверки разработанных геоэлектрохимических способов является анализ проб поверхностных отложений, отобранных над месторождениями УВ с глубины 0,4 – 0,5 м (раздел 4.3).

Лабораторные эксперименты на Королевском месторождении (юго-восток Прикаспийской впадины) проведены по 24 пикетам на шести геоэлектрохимических профилях [Шигаев В.Ю., Шигаев Ю.Г., 2002]. В пределах площади глубина залегания нефтегазоносной структуры составляет 4800 м, размер брахиантиклинали – $8,5 \times 4,5$ км по артинским отложениям. По распределению исходной концентрации ($C_{исх}$) Ti, Pb, Ni, Cu, Sr, а также их сумме месторождение не выделяется. После пропускания тока плановому положению месторождения соответствует аномальная зона повышенной концентрации ($C_{ток}$) сплошной формы, достигающая $400 \cdot 10^{-3} \%$ и выше.

Работоспособность разработки проверена на Жирновском месторождении (юго-восточный склон Воронежской антеклизы) на 20 пикетах по субширотному профилю [Шигаев В.Ю., 20096]. В пределах площади глубина залегания нефтегазоносной структуры составляет 398 м, размер брахиантиклинали – $9,5 \times 3$ км по верхнебашкирским отложениям. По результатам эксперимента установлены $C_{исх}$ и $C_{ток}$ для Mn, Pb, Sn, Cr, Ni, V, Mo, Cu, Ti, Co, Ba. Значения $C_{исх}$ имеют максимум вне контура месторождения и не превышают $110 \cdot 10^{-3} \%$. Максимальная концентрация $C_{ток}$ в контуре месторождения достигает $210 \cdot 10^{-3} \%$.

Лабораторный эксперимент на Таловском газовом месторождении (северная зона Прикаспийской впадины) выполнен на 49 пикетах по семи геоэлектрохимическим профилям, пересекающим структуру в субмеридианальном направлении [Шигаев В.Ю., Шигаев Ю.Г., 2002]. В пределах площади глубина залегания газоносной структуры составляет 880 м, размер брахиантиклинали – по $4,8 \times 2,9$ км по отложениям верхневолжского яруса. На картах распределения $C_{исх}$; относительного

параметра ΔU для Mn, Ni, V, Ti, Cu; суммы всех элементов отмечено отсутствие совпадения с контуром газоносности. Напротив, на карте распределения K_{Π} (Рисунок 3) видно, что максимальные значения комплексного параметра (1,5–4 отн. ед.) группируются в аномалии, опоясывающие по периферии внешний контур газоносности, что подтверждают эффект кольцевого окаймления месторождения.

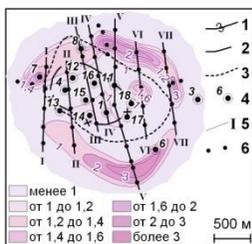


Рисунок 3 – Распределение комплексного параметра K_{Π} по результатам анализа элементного состава образцов горных пород на примере Таловской площади: 1–изолинии K_{Π} ; 2–внутренний контур газоносности; 3–внешний контур газоносности; 4–скважины; 5–геоэлектрохимические профили; 6–геоэлектрохимические пикеты.

Проверка работоспособности разработки на Михалковском месторождении (зона Саратовских дислокаций) выполнена по 21 геоэлектрохимическому пикету [Шигаев В.Ю., Шигаев Ю.Г., 2002]. Михалковская антиклинальная структура представлена двумя изолированными сводами – западным размером 3×2 км и восточным размером $2 \times 1,5$ км по саргаевскому горизонту. Глубина залегания нефтегазоносной структуры составляет 1001 м.

На площади отсутствуют аномальные параметры концентрации V, Ni, Ti до и после электрообработки образцов. Например, концентрация Ni по мере приближения к контуру месторождения изменяется незначительно от $11 \cdot 10^{-3}\%$ до $14 \cdot 10^{-3}\%$. Отсутствие аномальных параметров объясняется результатами полевого эксперимента, проведенного на двух пикетах: в контуре месторождения (пикет 30) и вне контура (пикет 0). В ходе эксперимента использовались 50- и 100-метровые разносы токовых электродов.

Результирующие материалы представлены в виде геоэлектрохимических годографов, отражающих зависимость отношения $\Delta U/I$ для каждого элемента-индикатора от времени пропускания тока. Относительный параметр ΔU нормирован на силу тока I с целью

минимизации влияния силы тока, меняющейся по техническим причинам. На пикете 0 за 90 мин пропускания тока зафиксировано увеличение $\Delta U/I$ на 50- и 100-метровом разносах в 1,5–2 раза, что подтверждает отсутствие аномальных значений концентрации в поверхностных образцах. На пикете 30 за это время зафиксировано увеличение $\Delta U/I$ в 3–7 раз на 100-метровом разносе электродов. Вблизи электрода, местоположение которого в течение 180 минут эксперимента не менялось, $\Delta U/I$ на 0-м пикете возросло в 1,5–2 раза, а на 30-м пикете – в 4–10 раз. Данный факт объясняется вовлечением в эксперимент отложений, залегающих ниже глубины отбора проб, что подтверждает ограниченное по вертикали распространение эпигенетического ореола.

Лабораторный эксперимент по изучению окислительно-восстановительной обстановки на Вольновском нефтяном месторождении (Рязано-Саратовский прогиб) выполнен на 71-м пикете по восьми геоэлектрохимическим профилям [Шигаев В.Ю., Волкова, Аверченкова, 2014]. В пределах Вольновской структуры глубина залегания нефтеносной структуры составляет 1005 м, размер брахиантиклинали – $5,6 \times 1,3$ км по меловым отложениям. На картах распределения $E_{h_{исх}}$ и $pH_{исх}$ контур нефтеносности отмечается не однозначно. Главным элементом на карте $K_{ОВП}$ является кольцевая аномалия повышенных значений этого параметра, достигающая 5–7 отн. ед. и более (Рисунок 4).

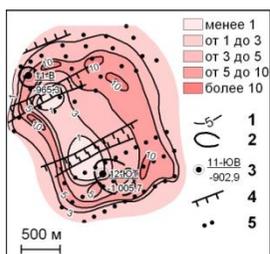


Рисунок 4 – Распределение комплексного параметра $K_{ОВП}$ по результатам анализа окислительно-восстановительной обстановки в образцах перекрывающих пород на примере Вольновской площади: 1–изолинии $K_{ОВП}$; 2–схематическое положение ловушки; 3–скважины; 4–граница зоны отсутствия коллекторов; 5–геоэлектрохимические пикеты.

Поиск нефтегазоносных объектов проведен в два этапа на площадях Степновского сложного вала (Рязано-Саратовский прогиб). На первом этапе построена геоэлектрохимическая прогнозно-поисковая модель

(ГППМ) Алексеевского нефтяного месторождения. На втором – построены ГППМ Заветной и Западно-Грязнушинской нефтегазоперспективных площадей и проведено их сравнение с ГППМ Алексеевского месторождения для оценки перспектив нефтегазоносности.

Алексеевская структура представляет собой комбинированную ловушку, образованную антиклинальной складкой и ограниченную разрывными нарушениями [Аниканов, Кангас, Лукашов, 1997]. Глубина залегания нефтеносной структуры составляет 2230 м. Размеры структуры – $2,0 \times 0,9$ км по воробьевским отложениям.

Лабораторный эксперимент на Алексеевском месторождении выполнен на 62-х пикетах по пяти геоэлектрoхимическим профилям. По результатам эксперимента построены карты распределения $C_{исх}$ Mn, Ni, V, Pb, Ti, Cu, их суммы, ΔU и K_{Π} . Аномальные параметры $C_{исх}$ с контуром нефтеносности месторождения не совпадают. Аномальные параметры ΔU для всех элементов-индикаторов распределены по площади мозаично с максимумами в зонах разломов. Непосредственно месторождению соответствует аномалия повышенных значений K_{Π} комбинированной формы, равная 1,2 – 1,4 отн. ед.

По данным МОГТ [Колкунов, Осипова, 2001] севернее Алексеевского месторождения по подошве воробьевских отложений выявлена антиклинально-блоковая Заветная структура, размером $1,4 \times 0,9$ км и глубиной залегания перспективных отложений – 2185 м. На исследуемой площади образцы отобраны с 95 пикетов по семи геоэлектрoхимическим профилям. На карте распределения K_{Π} структуре соответствуют три участка аномально высоких значений до 1,4 отн. ед., образующие единую зону кольцевой формы. Плановое положение проектируемой скв. Заветная 1 находится вне зоны аномально высоких значений K_{Π} , что указывает на неблагоприятные условия ее заложения [Шигаев Ю.Г., Шигаев В.Ю., 2001]. Позднее по результатам бурения поисковой скв. Заветная 1 структурные построения по данным МОГТ не подтвердились [Коган Я.Ш., Коновалова, Коган С.И., 2004].

На Западно-Грязнушинской площади поиск проведен на двух объектах, располагающихся в соседних горстах. Размеры объекта I – $0,7 \times 1,9$ км, объекта II – $0,7 \times 1,35$ км. Глубина залегания перспективных отложений составляет – 2210 и 2375 м соответственно.

На объекте I для проведения лабораторного эксперимента отобраны образцы на 75 пикетах по восьми геоэлектрoхимическим профилям, на объекте II – на 90 пикетах по восьми геоэлектрoхимическим профилям. На карте $C_{исх}$ всех элементов обоих объектов не зафиксировано совпадения

аномальных параметров с контурами структур. Концентрации изменяются в пределах $350\text{--}500 \cdot 10^{-3} \%$ и распределены по площадям мозаично. Практически для всех элементов-индикаторов на картах фиксируется распределение аномально высоких параметров ΔU и K_{Π} в форме кольца, окаймляющего предполагаемые ловушки УВ. Отмечается факт наиболее четкого проявления аномалий на объекте I. Согласно полученным результатам, исследуемые объекты являются нефтегазоперспективными [Шигаев Ю.Г., Шигаев В.Ю., 2003]. Впоследствии данный вывод подтвержден бурением [Харитонов, 2009; Ценарев, 2010].

Таким образом, разработанные способы элементного анализа надпродуктивных отложений являются действенным практическим инструментом проведения нефтегазопроисловых работ. Результаты лабораторных экспериментов подтверждают данный вывод. В частности установлена связь распределения аномальных параметров концентрации подвижных и близких им по формам химических элементов, Eh и pH с глубинами залегания и поперечными размерами структур с подтвержденной и предполагаемой нефтегазоносностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом работы является развитие геоэлектрохимического метода анализа элементного состава надпродуктивных отложений над предполагаемыми месторождениями нефти и газа. Разработка способов геоэлектрохимического анализа элементного состава горных пород и окислительно-восстановительной обстановки; устройств, обеспечивающих их реализацию; алгоритмов расчета геоэлектрохимических коэффициентов повышает достоверность, разрешающую способность и эффективность подтверждения наличия месторождений УВ, оконтуривания их границ и локализации нефтегазоперспективных геологических структур и повышает обоснованность их определения.

Способ геоэлектрохимического анализа элементного состава горных пород позволяет получать более ясную, точную и достоверную информацию за счет определения в образцах аномальных значений концентрации подвижных форм тяжелых металлов, поскольку они имеют значительно меньше природных источников, генетически не связанных с нефтегазовыми месторождениями, более устойчивы в поверхностных условиях, не уничтожаются при окислительных процессах и не поглощаются микроорганизмами.

Разработанный способ обеспечивает одновременное извлечение элементов-индикаторов на катоде и аноде конструктивно простых геоэлектрохимических устройств. Извлечение проводится при малом

количестве затраченного электричества без использования традиционных небезопасных кислотных электролитов, заполняющих элементоприемники, как это принято в способе частичного извлечения металлов.

Аномальные концентрации элементов-индикаторов в образцах горных пород в значительной степени зависят от интенсивности «дыхания» залежи. Когда эпигенетические изменения в породах перекрывающего комплекса не достигают поверхности, возможности способа резко ограничиваются из-за отсутствия подвижных форм элементов-индикаторов в отложениях или низких значений их концентрации.

Способ геоэлектрохимического анализа окислительно-восстановительной обстановки над предполагаемыми нефтегазоносными объектами позволяет получать более ясную, точную и достоверную информацию за счет получения контрастного градиента значений E_h и pH над месторождениями.

Окислительно-восстановительные реакции в минеральных системах приповерхностных отложений, насыщенных нефтью и газом, направлены на окисление УВ, сопровождаются понижением pH среды и не обеспечивают оконтуривание потенциально продуктивных структур по этому показателю. В способе реализован переход от исходной окислительно-восстановительной характеристики образцов горных пород к измерениям E_h и pH после воздействия электрического тока. В прикатодном участке за счет аккумуляции на катоде смол и асфальтенов и электролиза фиксируются аномальные значения pH и E_h , не достижимые в природных условиях приповерхностных отложений.

Ограничения применения способа связаны с возможным отсутствием в насыщающем водном растворе подвижных форм Mn (2^+ , 4^+), V (3^+ , 4^+ , 5^+), Ti (3^+ , 4^+), Ni (2^+ , 3^+), Cu (1^+ , 2^+), Pb (2^+ , 4^+) и др. E_h горных пород в этом случае будет определяться в основном концентрацией растворенного кислорода, и окислительно-восстановительный баланс в отложениях закономерно сдвинется в более кислую область, а потенциальный объект нефтегазоносности не выделится.

В работе адаптирован способ направленного суммирования предварительно нормированных относительно исходных значений концентрации каждого элемента-индикатора, E_h и pH для расчета геоэлектрохимических коэффициентов активизации геохимических процессов в образцах постоянным электрическим током.

Направленное суммирование проводится по каждому элементу-индикатору раздельно в различных направлениях от точек наблюдения на

дневной поверхности к источнику мигрировавших УВ. Оно включает расчет геоэлектрохимических коэффициентов активизации геохимических процессов в образцах постоянным электрическим током. Привлечение коэффициентов активизации представляет новую идеологию обработки и интерпретации результатов лабораторных экспериментов. Их использование при поисках месторождений УВ позволяет делать заключения о потенциальной нефтегазоносности геологических структур с высокой степенью достоверности.

Предложенные способы проверены на разных уровнях среза месторождений УВ, расположенных в различных нефтегазоносных провинциях: Прикаспийской (Королевское и Таловское месторождения); Волго-Уральской (Жирновское, Алексеевское, Михалковское, Вольновское месторождения); Западно-Сибирской (Ивановское месторождение); Ферганской (месторождение Чангыр-Таш). Выполненные на трех нефтегазоперспективных площадях – Заветной, Западно-Грязнушенской – объекты I и II (Степновский сложный вал) нефтегазопроисковые работы показали следующее. Для Заветной площади дано отрицательное заключение о потенциальной нефтегазоносности структуры. Для двух объектов Западно-Грязнушинской площади дано положительное заключение о потенциальной нефтегазоносности структур. На всех объектах заключения подтверждены последующим бурением.

Важным результатом проведенных лабораторных экспериментов является установленное распределение параметров геоэлектрохимических аномалий в поверхностных отложениях в связи с глубинами залегания и поперечными размерами изучаемых геологических объектов.

Достоинством разработанных способов является универсальность: применение не ограничивается подтверждением наличия месторождений УВ, оконтуриванием их границ и локализацией нефтегазоперспективных геологических структур, оно расширяется за счет поиска и разведки рудных месторождений, геоэкологических и инженерно-геологических исследований, направленных на картирование техногенных органических загрязнений и электроукрепление (литификацию) глинистых пород с целью улучшения их инженерно-геологических свойств. При решении геоэкологических задач оконтуривание зон углеводородного загрязнения верхней части разреза, а также поиск и разведка рудных месторождений проводится по аномальным значениям концентрации подвижных форм тяжелых металлов и рН, Eh.

Литификация глинистых пород осуществляется с привлечением коагулирующих добавок и алюминиевых электродов. В постоянном поле электрического тока в обменный комплекс глин вместо одновалентных Na^+ и K^+ входят катионы Al^{3+} . За счет этого происходит сжатие обкладок

двойного электрического слоя, концентрационная коагуляция мелких глинистых частиц. При наличии электролитов и коагулянтов за счет электролиза в глинах изменяется химико-минералогический состав, образуются новые твердые фазы и, как следствие, повышается их прочность.

Несомненно, исследования по развитию геоэлектрохимического метода элементного анализа горных пород для подтверждения нефтегазоносности геологических структур должны быть продолжены по широкому кругу вопросов, с привлечением специалистов в различных областях знаний.

Во-первых, необходимо дальнейшее развитие теоретико-методической базы геоэлектрохимического метода, связанное с учетом ограниченного распространения вторичных ореолов рассеяния над месторождениями УВ. При активном привлечении для этого результатов полевых экспериментов по-прежнему нуждается в объяснении достоверность оценки объема горных пород, вовлекаемых с поверхности в электрохимические преобразования. В связи с интенсивным освоением природных ресурсов северных регионов необходимо расширение области применения предложенных способов и их апробация в криолитозоне, где многолетнемерзлые породы могут являться природными экранами для распространения вторичных ореолов рассеяния.

Во-вторых, требуется обновление аппаратного обеспечения предложенных способов, в частности, привлечение для определения концентрации элементов-индикаторов методов химико-аналитических исследований с высоким порогом чувствительности. Для проведения лабораторных экспериментов назрело использование современных источников питания большой мощности с режимом стабилизации тока и напряжения.

В-третьих, перспективным направлением дальнейшего развития разработанных способов является расширенное использование геоэлектрохимического анализа образцов шлама и керна с целью оперативного реагирования на изменения нефтегазоносности по разрезу поисковых и разведочных скважин.

При всей актуальности перечисленных задач дальнейшее развитие способов геоэлектрохимического анализа будет определяться уровнем проведения интерпретации получаемых материалов. Приоритетным здесь является внедрение цифровых методов обработки результатов при тесном взаимодействии с разработчиками специализированных компьютерных систем искусственного интеллекта.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. **Шигаев В.Ю.** Геоэлектрохимические исследования при поисках нефтегазоперспективных объектов / **В.Ю. Шигаев, Ю.Г. Шигаев.** – Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2002. – 147 с.

2. **Шигаев В.Ю.** Геоэлектрохимические исследования геологической среды / **В.Ю. Шигаев.** – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2012. – 184 с.

Патенты

3. Патент 2178189 РФ, МКИ7 G01V3/00. Способ геоэлектрохимического прогнозирования нефтегазоносности / **В.Ю. Шигаев, С.И. Михеев, Ю.Г. Шигаев** (РФ; Нижне-Волжский научно-исследовательский институт геологии и геофизики). – № 2000125434/28; Заявл. 09.10.00; Оpubл. 10.01.02. Бюл. № 1 (II ч). – С. 393.

4. Патент 2236314 РФ, МПК7 B09B3/00, E02D3/11. Способ литификации вязкопластичных промышленных отходов / **В.Ю. Шигаев, Ю.Г. Шигаев, Д.А. Плюснин** (РФ). – №2003105004; Заявл. 19.02.03; Оpubл. 20.09.04. Бюл. № 26 (III ч). – С. 417.

5. Патент 47365 РФ, МПК7 C25B9/00. Устройство для мониторинга физико-химических параметров образцов горных пород / **В.Ю. Шигаев, Ю.Г. Шигаев, Д.А. Плюснин, А.В. Карпенко** (РФ; ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»). – 2005111426/22; Заявл. 18.04.05; Оpubл. 27.08.05. Бюл. № 24. – С. 685.

6. Патент 66066 РФ, МПК51 G01V13/00. Устройство для магнитометрических измерений сыпучих образцов горных пород / **В.Ю. Шигаев, Ю.Г. Шигаев** (РФ; ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»). – № 20071149221122; Заявл. 19.04.07; Оpubл. 27.08.07. Бюл. № 24.

7. Патент 2337383 РФ, МПК51 G01V11/00. Технология прогноза нефтегазоносности / **В.Ю. Шигаев, С.И. Михеев, Ю.Г. Шигаев, А.В. Шамапов** (РФ; ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»). – №2007111781; Заявл. 02.04.07; Оpubл. 27.10.08. Бюл. № 30.

8. Патент 2402049 РФ, МПК51 G01V11/00. Способ геофизической разведки месторождений нефти и газа / **М.И. Рыскин, Е.Н. Волкова, В.Ю. Шигаев, Ю.Г. Шигаев, И.Ю. Фролов, А.С. Михеев** (ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»). – № 2009117565/28, Заявл. 12.05.09; Оpubл. 20.10.10. Бюл. № 29.

9. Патент 2416115 РФ, МПК51, G01V0/00. Способ геоэлектрохимического прогнозирования нефтегазоносности / **В.Ю. Шигаев, Ю.Г. Шигаев** (РФ; ГОУ ВПО «Саратовский

государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»). – № 2009147832/28, Заявл. 22.12.2009; Оpubл. 10.04.11. Бюл. № 10.

10. Патент 111295 РФ, МПК51 G01N7/04. Устройство для лабораторного варианта сейсмогеоэлектрохимических исследований / Ю.Г. Шигаев, **В.Ю. Шигаев**, Э.С. Шестаков (РФ; ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»). – № 2011134890/28, Заявл. 19.08.2011; Оpubл. 10.12.11. Бюл. № 34.

11. Патент 2473928 РФ, МПК51, G01V1/00. Способ поисков залежей нефти и газа / Ю.Г. Шигаев, Э.С. Шестаков, **В.Ю. Шигаев** (РФ; ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»). – № 201136021/28, Заявл. 29.08.2011; Оpubл. 27.01.13. Бюл. № 3.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

12. **Шигаев В.Ю.** Геоэлектрохимический метод поисков месторождений углеводородов / **В.Ю. Шигаев** // Изв. вузов. Геология и разведка. – 2003. – № 6. – С. 64–68.

13. **Шигаев В.Ю.** Выявление пространственных закономерностей размещения нефтегазоперспективных зон геоэлектрохимическим методом / **В.Ю. Шигаев** // Изв. вузов. Геология и разведка. – 2005а. – № 1. – С. 44–47.

14. Технология прогноза нефтегазоносности по геоэлектрохимическим и сейсморазведочным данным / **В.Ю. Шигаев**, С.И. Михеев, Ю.Г. Шигаев, А.В. Шаманов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2005б. – № 11. – С. 45–49.

15. Конценебин Ю.П. Исследование наложенных ореолов рассеяния микроэлементов геоэлектрохимическим методом при поисках нефти и газа / Ю.П. Конценебин, **В.Ю. Шигаев**, Ю.Г. Шигаев // Вестн. Воронеж. Гос. ун-та. Серия геология. – 2006. – № 1. – С. 142–145.

16. **Шигаев В.Ю.** Влияние постоянного тока на изменения физико-химических параметров горных пород / **В.Ю. Шигаев** // Цветные металлы. – 2009а. – № 11, – С. 12–14.

17. **Shigaev V.Yu.** Electrochemical effects in rocks: petroleum exploration and engineering-geological applications / **V.Yu. Shigaev** // Russian Geology and Geophysics. 2009б. Т. 50. № 11. С. 991–994.

18. Рациональное комплексирование геофизических и геохимических методов прогноза нефтегазовых залежей / М.И. Рыскин, Е.Н. Волкова, С.И. Михеев, И.Ю. Фролов, **В.Ю. Шигаев** // Изв. вузов. Геология и разведка. – 2010. – № 1. – С. 59–63.

19. **Shigaev V.Y.** Tendencies of the evolution of physicochemical properties of surface deposits under the influence of direct electric current / **V.Y. Shigaev** // Doklady Earth Sciences. 2011а. Т. 436. № 1. С. 58–60.

20. **Шигаев В.Ю.** Комплексование геоэлектрохимических методов прогнозирования нефтегазоносности / **В.Ю. Шигаев**, М.В. Решетников // Геофизика. – 2011. – № 3. – С. 29–31.
21. **Shigaev V.Y.** The electrochemical interrelation of physicochemical parameters of rocks containing heavy metals // **V.Y. Shigaev** // Doklady Earth Sciences. 2011б. Т. 441. № 1. С. 1595–1597.
22. **Шигаев В.Ю.** Физико-химические факторы локализации геоэлектрохимических аномалий при прогнозировании нефтегазоносности / **В.Ю. Шигаев** // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2012. – № 1. – С. 42–44.
23. **Шигаев В.Ю.** Геоэлектрохимические исследования физико-химической обстановки надпродуктивных отложений / **В.Ю. Шигаев**, Е.Н. Волкова, Е.В. Аверченкова // Геофизика. – 2014. – № 1. – С. 53–56.
24. **Шигаев В.Ю.** Геоэлектрохимическая прогнозно-поисковая модель нефтегазовых месторождений / **В.Ю. Шигаев** // Геофизика. – 2014. – № 3. – С. 72–77.
25. **Шигаев В.Ю.** Геоэлектрохимический анализ физико-химической обстановки надпродуктивных отложений месторождений углеводородов / **В.Ю. Шигаев**, Ю.Г. Шигаев, С.А. Руднев // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 1. – С. 48–52.
26. **Shigaev V.Y.** Foundations of petroleum prediction based on the activation of geochemical processes by direct current // **V.Y. Shigaev** // Russian Geology and Geophysics. 2018. Т. 59. № 11. С. 1508–1513.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать 14.01.2025

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 2,0. Тираж 100. Зак. № 00

ИНГГ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3