

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
**Пермский федеральный
исследовательский центр
Уральского отделения
Российской академии наук**
(ПФИЦ УрО РАН)

ул. Ленина, 13а, г. Пермь, 614000
тел. (342) 212-60-08, факс 212-93-77
E-mail: psc@permisc.ru, http://www.permisc.ru
ОКПО 48420579, ОГРН 1025900517378
ИНН 5902292103, КПП 590201001

26.12.2023 № 337/2171-523

на № _____ от _____
□

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ПФИЦ УрО РАН,
член-корреспондент РАН,

д.ф.м.н

О.А. Плехов



О Т З Ы В

ведущей организации

на диссертационную работу Пономаренко Ивана Александровича
«Анализ геолого-геофизической информации с применением метода
группового учета аргументов» по специальности 1.6.9 – геофизика
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Диссертационная работа Пономаренко И.А. посвящена развитию и применению вероятностно-статистического подхода в процессе интерпретации геолого-геофизических материалов и обработке данных петрофизических измерений.

Объект, предмет и актуальность исследований

Объектом исследований являются результаты полевых геофизических наблюдений и данные лабораторных петрофизических измерений, в которых присутствуют сложные и слабо проявленные взаимосвязи между аномалиями физических полей, физическими характеристиками и вещественным составом горных пород.

Предметом исследований являются возможности метода группового учета аргументов (МГУА), который предлагается в качестве нового математического инструмента анализа разнородной геолого-геофизической информации.

Актуальность представленных в диссертации исследований не вызывает сомнений, т.к. она определяется их направленностью на развитие интеллектуального анализа разнородной геолого-геофизической информации, базирующегося на машинном самообучении с помощью МГУА. Этот метод использует не априорно заданную многомерную структуру модели, а генерирует и анализирует множество вариантов корреляционных связей, уравнения которых отличаются не только численными коэффициентами, но и набором компонентов-факторов. Метод базируется на рекурсивном селективном отборе моделей с увеличением точности моделирования на каждом следующем шаге за счет усложнения модели. МГУА является альтернативой традиционному регрессионному анализу и нейросетевому моделированию, которые в настоящее время широко используются в практике геофизических исследований.

Устойчивыми тенденциями в прикладной геофизике являются, с одной стороны – расширение круга и усложнение решаемых геологических задач, с другой – увеличение точности и объемов цифровых экспериментальных данных, на фоне непрерывно возрастающих вычислительных возможностей компьютеров (закон Мура). Усовершенствование МГУА и внедрение его в практику геофизических работ полностью согласуется с этими тенденциями.

Цель и задачи исследований

Целью исследований являлись разработка алгоритма, программного обеспечения и методики использования МГУА для математического моделирования при обобщении данных о физических свойствах кристаллических горных пород Воронежского кристаллического массива, при изучении коллекторских свойств месторождений углеводородов Западной Сибири по данным геофизических исследований скважин (ГИС), при учете влияния рельефа земной поверхности на результаты аэромагнитной съемки в пределах плато Путораны, расположенного в Восточной Сибири.

Основными задачами, поставленными перед диссертантом, были: разработка специализированного алгоритма МГУА, предназначенного для работы с геолого-геофизической информацией; формирование методики применения МГУА для обобщения и анализа петрофизической информации, а также для оценки коллекторских свойств нефтегазоносных объектов по данным ГИС; разработка способа учета влияния рельефа местности на основе корреляционных взаимосвязей между аномалиями магнитного поля и высотными отметками земной поверхности.

Каждая из перечисленных выше задач исследований вынесена в отдельное защищаемое положение, которые будут рассмотрены ниже.

Первое защищаемое положение: «алгоритм и программа для идентификационного моделирования методом группового учета аргументов, адаптированные к работе с геолого-геофизической информацией, позволяющие получать достоверные полиномиальные модели в процессе анализа комплексных геолого-геофизических данных» характеризует в целом инструмент интерпретации, использующийся для решения разнообразных геологических задач. Сразу необходимо отметить, что МГУА является новым для математической геофизики методом, хотя полностью отвечает основным требованиям к построению регрессионных математических моделей. В процессе индуктивного моделирования удастся установить связи между множеством параметров геологического объекта (или совокупности объектов) и наблюдаемыми значениями геофизических полей.

Лучшая модель выбирается из множества вариантов по определенному критерию, что согласуется с идеей о существовании множества допустимых решений и конструировании оптимального решения по этому множеству. Представление исходных данных в виде числовой матрицы, способы их формализации, а также вывод результатов в виде идентификационного структурно-параметрического уравнения, являющего моделью изучаемого объекта, явления или процесса, обеспечивает возможность включения МГУА в современные автоматизированные системы обработки геофизических данных.

В диссертации сказано, что МГУА, во многом близкий к искусственным нейронным сетям, имеет ряд преимуществ перед последними, т.к. использует более мощные полиномиальные функции, эффективные критерии оптимизации для автоматического определения размера и связности сети, а также для расчета элементов и коэффициентов модели. Рассматриваются два критерия – критерий регулярности и критерий минимума смещения.

Диссертантом разработан и реализован на языке программирования СИ++ многорядный алгоритм МГУА с комбинаторным перебором вариантов. В качестве базовой модели используется полином Колмогорова-Габора второй степени. Отличительными особенностями программы GMDHmod являются возможность обработки, как малых, так и больших объемов данных; совместимость с данными специальных форматов, используемых в практике геофизических измерений; произвольный выбор зависимой переменной и переменных-аргументов; визуализация промежуточных результатов работы алгоритма; вывод графиков модельных и экспериментальных значений зависимой переменной, таблицы с модельными и экспериментальными значениями переменных, параметров всех сгенерированных моделей.

Второе защищаемое положение конкретизирует одну из областей практического применения МГУА: «методику обработки петрофизических данных методом группового учета аргументов, формирующую достоверную комплексную идентификационную модель, объединяющую несколько петрофизических параметров в единую полиномиальную зависимость с целью решения задач анализа, обобщения, робастного оценивания и идентификации

петрофизических данных». Известно, что высокая достоверность петрофизических моделей является важнейшим элементом успешного решения любых поставленных геологических задач с помощью геофизических методов. Как правило, взаимосвязь между геологическими и геофизическими данными носит весьма расплывчатый и неопределенный характер, что, в частности может быть связано с фракталоподобным строением горных пород (согласно А.И. Кобрунову). Уточнение этой взаимосвязи возможно за счет грамотного применения вероятностно-статистических методов при обработке и анализе петрофизических данных.

Пономаренко И.А. на примере материалов базы данных, полученных в результате многолетних лабораторных измерений физических свойств керна 447 скважин, пробуренных на территории Воронежского кристаллического массива и его обрамления показал преимущества МГУА перед традиционной статистической обработкой. База данных содержит значения плотности, скорости продольных волн, магнитной восприимчивости, естественной остаточной намагниченности, удельного сопротивления, поляризуемости и радиоактивности пород около 90000 образцов. Для большинства структурно-вещественных, интрузивных и ультраметаморфических комплексов региона с помощью МГУА получены структурно-параметрические уравнения, связывающие петрофизические, геологические и пространственные атрибуты. Это позволяет выполнить идентификационный, классификационный и пространственный анализ данных при формировании петроплотностной цифровой модели верхней части литосферы Воронежского кристаллического массива по аномальному гравитационному полю в редукции Буге.

Важным аспектом применения МГУА является робастное оценивание экспериментальных петрофизических данных. Приведенный в диссертации пример по сланцам александровской свиты, к которой удалось отнести только 74% от общего количества образцов, выглядит весьма убедительным. Вполне можно согласиться с мнением диссертанта, базирующемся на уравнениях (3.1)–(3.4) о том, использование МГУА может существенно повысить качество идентификационной модели.

Третьим защищаемым положением является «методика обработки данных геофизических исследований скважин методом группового учета аргументов, позволяющая выполнить надежную оценку коллекторских свойств разреза и определить наиболее эффективные методы исследований в конкретных физико-геологических условиях». Эта методика прошла апробирование на материалах по 16 скважинам на 4-х нефтегазовых месторождениях – Ватъеганском, Паховском, Усть-Котухтинском, Южно-Ягунском, расположенных в Западной Сибири. Объем исходных данных ~100 000 точек измерений комплекса ГИС (каротаж сопротивления КС, каротаж потенциала собственной поляризации СП, боковое каротажное зондирование БКЗ, микрозондирование МКЗ, боковой каротаж БК, индукционный каротаж ИК, гамма-каротаж ГК, нейтронный гамма-каротаж НГК, нейтронный каротаж по тепловым нейтронам НТК, плотностной гамма-гамма- каротаж ГГК-П, акустический каротаж АК, кавернометрия КВ, резистивиметрия, инклинометрия, термометрия и др.), результат – 211 модельных уравнений.

Выделение коллекторов в разрезе скважин осуществлялось в два этапа. На первом этапе использовались данные ГИС по эталонной скважине и строились модельные уравнения, отражающие корреляционные зависимости между идентификатором коллектора и геофизическими параметрами по данным нескольких методов комплекса ГИС. На втором этапе происходило применение идентификационных моделей на рядовых скважинах в аналогичных физико-геологических условиях, что позволило успешно осуществить выявление коллекторов. Полученные результаты близки к результатам независимой комплексной интерпретации данных каротажа, выполненной традиционными способами.

Также представлен пример определения типа флюидонасыщения (вода или нефть) коллектора по комплексу данных ГИС, включающих в себя результаты гамма-каротажа, индукционного каротажа и каротажа сопротивления с обращенными градиент-зондом и потенциал-зондом. С достаточной точностью по результатам МГУА удалось оценить величину коэффициента

пористости по данным КС (4 градиент-зонда разной длины) и ГК. Используемая для этого полиномиальная модель была получена на 3-м ряду селекции.

Четвертое защищаемое положение представляет собой «способ вероятностно-статистического учета влияния магнитного рельефа дневной поверхности в пределах больших магматических провинций, базирующийся на синтезе методов группового учета аргументов и эмпирической модовой декомпозиции, позволяющий эффективно идентифицировать частотные составляющие аномального магнитного поля, наиболее тесно связанные с перепадами высот земной поверхности». Вопрос учета влияния расчлененного рельефа местности на результаты аэромагнитных съемок актуален для больших магматических провинций, в т.ч. для Восточной Сибири. Возможности моделирования аномального эффекта верхней части геологического разреза (топопоправки) путем решения прямой задачи магниторазведки в данном случае ограничены из-за влияния латеральной изменчивости петромагнитных характеристик, низкой детальности цифровых моделей рельефа, влияния сферичности Земли. Работу с архивными материалами также осложняет отсутствие сведений о фактической высоте съемочных полетов.

Преимущества статистических методов определения магнитных аномалий, обусловленных резко расчлененным рельефом земной поверхности в пределах больших магматических провинций, являются очевидными. Предлагаемый Пономаренко И.А. способ поправок за влияние расчета δT_p , базирующийся на последовательном применении эмпирической модовой декомпозиции (англ. – EMD) и МГУА, является достаточно точным и требует меньших трудозатрат, чем вычисление топопоправки с использованием решений прямой задачи магниторазведки от цифровой модели рельефа.

В диссертации приведен пример редуцирования материалов аэромагнитных съемок северо-западной части Сибирской платформы масштаба 1:100 000–1:50 000 для площади около 316 тыс. кв. км по сети 2×2 км. Предварительно было проведено районирование территории с целью выделения блоков, отличающиеся по характеру аномального магнитного поля и рельефа местности. Предполагалось, что теснота и характер взаимосвязи магнитного поля и

рельефа в пределах различных блоков не может быть одинаковой. Представленный подход оказался весьма конструктивным и позволил выделить составляющую аномального геомагнитного поля, обусловленную влиянием покрывающей трапповой толщи. Эта составляющая вносит существенный вклад (более 40%) в энергию интерпретируемого магнитного поля.

Научная новизна и практическая значимость полученных результатов

Научная новизна исследований диссертанта заключается в создании алгоритма идентификационного моделирования МГУА, ориентированного на работу с геолого-геофизической информацией. МГУА используется для интеллектуального анализа больших объемов цифровых данных и может рассматриваться как альтернатива широко использующихся в прикладной геофизике нейросетевых технологий. Его можно отнести к реализации т.н. «мягких вычислений» (термин Л. Заде, 1994) и к весьма широкой группе алгоритмов эволюционной оптимизации (к которой, в частности, относятся генетические алгоритмы). Пономаренко И.А. убедительно доказано, что МГУА может эффективно использоваться с целью обобщения и анализа комплексных петрофизических данных, для оценки коллекторских свойств разреза в пределах нефтегазовых месторождений по данным ГИС, при учете влияния рельефа местности на результаты аэромагниторазведки, выполненной в пределах больших магматических провинций. В последнем случае отпадает необходимость привлечения дополнительных сведений о магнитных свойствах горных пород верхней части геологического разреза.

Несомненную *практическую значимость* имеет разработанное программно-алгоритмическое обеспечение, реализующее МГУА, которое может использоваться как в процессе научных исследований, так и в работе производственных организаций, занимающихся изучением недр и эксплуатацией месторождений полезных ископаемых. В настоящее время программа GMDHmod активно используется в научно-исследовательской деятельности преподавателей, аспирантов и студентов кафедры геофизики Воронежского государственного университета, а также в учебном процессе при подготовке

магистерских диссертаций и бакалаврских работ.

Достоверность результатов исследований Пономаренко И.А. определяется применением теоретически обоснованного научно-методического аппарата, известных положений наук о Земле, математики, физики, вычислительной математики и программирования. Выполнен системный анализ проблемы идентификационного моделирования, применен широкий спектр теоретических и экспериментальных исследований, результаты которых хорошо согласуются между собой и не противоречат имеющейся геолого-геофизической информации. В частности, применение МГУА для определения петроплотностных характеристик Воронежского кристаллического массива позволило обеспечить геологическую содержательность объемных моделей земной коры. Также отмечается близость результатов редуцирования среднемасштабной аэромагнитной съемки в Восточной Сибири, полученных с помощью технологии, основанной на синтезе метода EMD и МГУА, к результатам, полученным с помощью алгоритма компенсирующей фильтрации в системе спектрально-корреляционного анализа трехмерных геоданных КОСКАД 3D.

Основные замечания по диссертационной работе

1. В тексте работы полностью отсутствуют сведения о скорости вычислений с помощью созданного программно-алгоритмического обеспечения, предназначенного для анализа достаточно больших массивов цифровых данных.
2. Эффективность использования МГУА проиллюстрирована только на практических материалах. Объективным свидетельством преимущества МГУА перед традиционными приемами регрессионного анализа (метод наименьших квадратов, метод максимального правдоподобия, множественная корреляция) мог бы стать синтетический пример (имитационное моделирование с искусственным зашумлением анализируемых данных).
3. Подробное рассмотрение комплексов ГИС, выполненных на месторождениях углеводородов Западной Сибири, представленное в главе 4, представляется избыточным, т.к. для идентификационного моделирования пластов-коллекторов не все эти данные использовались.

4. В главе 5 желательно было дать краткую характеристику метода эмпирической модовой декомпозиции (EMD), недостаточно знакомому большинству специалистов-геофизиков.
5. При выполнении районирования территории сводной аэромагнитной карты (рис. 5.6) формальное сходство классов, выделенных в пределах Сибирской платформы и Енисей-Хатангского прогиба (западная и северная части площади) следует принимать с большой осторожностью. В пределах Енисей-Хатангского прогиба интенсивные магнитные аномалии обусловлены не дневным рельефом пород базальтовой формации, а глубокозалегающими крупными магматическими телами ультрамафитов, перекрытыми мезокайнозойскими отложениями.

Выводы

Перечисленные выше замечания не умаляют достоинств диссертации Пономаренко И.А. Она является законченной научно-квалификационной работой, обладающей внутренним единством, научной новизной и практической значимостью. В диссертации представлено самостоятельное решение актуальной научной задачи разработки программно-алгоритмического обеспечения и методики применения МГУА для анализа геолого-геофизической информации, имеющей существенное значение для прикладной геофизики. Полученные результаты и сформированные идентификационные модели подтверждают высокую перспективность использования нового инструмента интеллектуального анализа данных для решения широкого круга прикладных задач.

Полученные результаты базируются на большом объеме исходных геолого-геофизических данных, их анализе, моделировании, интерпретации и визуализации. Все научные положения, выводы и рекомендации полностью обоснованы. Четыре сформулированные диссертантом защищаемые положения полностью раскрыты в тексте работы. Текст написан грамотным профессиональным языком, содержит все необходимые формулы и высококачественные цветные рисунки. Иллюстративный материал и таблицы хорошо

дополняют содержание разделов. Диссертационная работа в целом полностью отвечает формуле специальности 1.6.9 и п.п. 16, 17, 20, 24 паспорта специальности.

Автореферат и 34 опубликованных работы отражают основное содержание диссертации. Среди имеющихся публикаций - 5 статей в рецензируемых научных изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Результаты проведенных исследований неоднократно докладывались на Международных и Всероссийских научных конференциях.

Диссертационная работа отвечает критериям, указанным в Постановлении Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 "О порядке присуждения ученых степеней" (в действующей редакции), а её автор – Пономаренко Иван Александрович, несомненно *заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика.*

Ведущий научный сотрудник
лаборатории геопотенциальных
полей "ГИ УрО РАН",
доктор технических наук

М.С. Чадаев

Подпись Чадаева М.С. заверяю:

Главный специалист
отдела кадров "ГИ УрО РАН"

С.Г. Дерюженко

