

**Некоммерческое акционерное общество «Восточно-Казахстанский
технический университет им.Д.Серикбаева»**

ОО «Международная академия информатизации» (МАИН)

ОТЧЁТ

«Разработка и модернизация математического и программного обеспечения для сборки технологической системы цифрового прогнозирования рудных объектов с низким статусом открываемости»

(по оказанию ВКТУ субподрядных услуг в рамках проекта «Научная оценка
инвестиционной привлекательности структур Казахстана перспективных на
выявление месторождений полезных ископаемых» на основании договора
№14-2021 от 25.11.2021г.)

Сроки выполнения субподрядных услуг 25.10.2021-23.11.2021года)

Исполнители от МАИН

Лось В.Л.
Мурзадилов Т.Д.
Легонькин В.С.

Генеральный директор МАИН



А.Ф.Цеховой

Алматы, 2021

Содержание:

1. Содержательная и формальная постановка задачи прогнозирования рудных объектов.....	3
2. Формирование теоретико-вероятностной модели переноса геохимического вещества на основе методологии статистической физики и физической химии. Разработка бета-версии программы оценки геохимических полей на глубине по данным поверхностного опробования.	16
3. Программа (в стандартах ПК Elan) расчёта физико-химических параметров геологической среды по данным силикатных анализов.	38
Модернизация программы Modeling (ПК Elan), предназначенной для построения аппроксимационных моделей 1-3D физических и виртуальных характеристик геологического пространства.....	45
5. Модернизация процедуры моделирования методом «скользящее окно» (программа Runwind, ПК Elan) с приданием ей функции вычисления корреляции между характеристиками геологической среды	58

1. Содержательная и формальная постановка задачи прогнозирования рудных объектов

Инвестиционная привлекательность недр определяется, в первую очередь, надёжностью и точностью их оценки на различные типы полезных ископаемых (в данном проекте рассматриваются рудные полезные ископаемые). Стартовой операцией оценки недр является прогноз полезных ископаемых – наиболее сложная геологоразведочная процедура, в которой органически соединяются геологические данные и знания с компьютерными технологиями анализа и моделирования многомерных нелинейных систем.

1.1 Проблема прогнозирования полезных ископаемых.

Имеется две главные операции оценки недр на рудные полезные ископаемые: выявление новых рудных объектов (прогнозно-поисковые работы) и геолого-экономическая оценка месторождений (разведочные работы) (рисунки 1). Конечной целью прогнозно-поисковых работ является выявление новых, неизвестных на момент проведения работ рудных объектов иерархического уровня от рудных районов до месторождений; конечная цель разведочных работ – построение 3D моделей месторождений, выделение рудных тел с подсчетом запасов и промышленно-экономическая оценка новых месторождений (или переоценка известных).



Рисунок 1. Операции оценки недр на рудные полезные ископаемые.

Первая операция основывается на взаимосвязи свойств геологической среды и представляет собой прямую геопризнаковую задачу, заключающуюся в переходе из одного признакового пространства в другое с его сжатием:

$$(x, y, z; \{t\}^n) \xrightarrow{f} (x, y, z; \{T\}^m)$$

где x, y, z - координаты ($x, y, z \in V$);

$\{t\}^n$ - пространство прогнозирующих (косвенных) характеристик;

$\{T\}^m$ - пространство целевых характеристик прогнозирования ($m \ll n$), а часто $m=1$;

f - оператор перехода (сжатия информации), т.е. технологии прогнозирования.

При прогнозно-поисковых работах резко уменьшается общее количество информации, но также резко возрастает ее целевая ценность (по отношению к задаче прогноза). одновременно производится и резкое сокращение размеров области прогнозно-поисковых работ v , в которой по значениям m выделяются перспективные площади v_p ($v_p \ll v$). В идеале, площадь v_p обращается в точку или точки задания поисково-оценочных скважин.

В операциях разведки месторождений почти не меняется признаковое пространство (обычно это содержания полезных компонентов), но происходит расширение информации с помощью процедур интерполяции, экстраполяции и аппроксимации данных с развёрткой пространства из 0D в 3D.

В настоящее время особых проблем с геолого-экономической оценкой рудных месторождений нет, если не считать чисто экономических. Однако, с операцией выявления новых рудных месторождений в ситуации практически полного исчерпания фонда легкооткрываемых объектов дело обстоит гораздо сложнее и здесь простое увеличение финансирования без качественного повышения уровня всех составляющих прогнозно-поисковых работ автоматически не приведёт к повышению их эффективности и продуктивности. Это определяется, прежде всего, **трудностью самой задачи прогнозирования скрытых рудных объектов**, решение которой связано с изучением и моделированием условий формирования и закономерностей размещения сложных диффузных нелинейных систем с самоорганизацией в неоднородной и нелинейной геологической среде [1]. По нашему мнению, главными проблемами прогноза рудных полезных ископаемых являются:

- недостаточная обоснованность и «догматичность» научно-методологической базы прогнозирования (следствие: металлогения не стала существенным фактором прогнозирования рудных объектов);

- невысокая «прогностическая ценность» используемой информации, её представление в слабых шкалах и низкая степень формализации;

- собственно прогноз в массе продолжает опираться на субъективные экспертные мнения, сложившиеся стереотипы, простейшие аналогии и почти не использует возможности математического моделирования, «добычи знаний» из данных, методы и цифровые технологии преобразования знаний и числовой информации в прогнозные оценки недр.

Подчеркнём, что в настоящее время необходимо ориентироваться, т. е. использовать соответствующие знания, информацию и технологии, на выявление рудных объектов с низким статусом открываемости: глубоко залегающих, перекрытых аллохтонными отложениями (рыхлыми, базальтами и т. п.), не имеющих явных индикативных признаков на поверхности.

Повышение роли прогнозирования при изучении недр определяется следующими главными факторами:

- изменением геологоразведочной ситуации, обусловленной значительным уменьшением вероятности выявления месторождений по прямым признакам оруденения (исчерпание фонда рудных объектов с низким статусом открываемости);

- естественным развитием геологии и геологоразведочных технологий от описательных качественных к прогностически ориентированным и цифровым;

- необходимостью долгосрочного планирования инвестиций в изучение и разведку недр, а также потребления невозполнимого минерального сырья в рамках безальтернативной концепции устойчивого развития.

Актуальность технологической модернизации прогнозирования определяется тем, что решение задачи восполнения и развития минерально-сырьевой базы рудных полезных ископаемых становится всё более сложным и дорогим. Дело в том, что геологоразведочная ситуация постепенно, но коренным образом изменилось по сравнению с серединой 20-го века. В настоящее время очень мала вероятность выявления рудных объектов, выходящих на дневную поверхность, и результативность традиционных прогнозно-поисковых методов стала близкой к нулю. Сейчас необходимо ориентироваться, т. е. использовать соответствующие знания, информацию и технологии, на выявление рудных объектов с низким статусом открываемости: глубоко залегающих, перекрытых аллохтонными отложениями (рыхлыми, базальтами и т. п.), не имеющих явных индикативных признаков на поверхности. Усложнение геологоразведочной ситуации привело и к значительному удорожанию работ по выявлению новых месторождений. Так в 1965г средняя по миру стоимость открытия (в сопоставимых ценах) одного месторождения цветных металлов была 13-14 млн. долларов, а в настоящее время - 40-50 млн. долларов (по некоторым данным даже существенно больше). Результаты работ по изучению недр Казахстана оцениваются различно, но отсутствие открытий новых значимых рудных объектов в течении 20-30 лет является фактом. И этот факт чётко указывает на необходимость **формирования новых технологических подходов** при проведении прогнозно-поисковых работ.

В целом, низкая эффективность прогноза связана, прежде всего, с трудностью самой задачи прогнозирования рудных объектов (это задача поведения сложных диффузных нелинейных систем с самоорганизацией при недостаточной информации об этих системах и невозможностью наблюдать динамику их развития). По нашему мнению, главными проблемами прогноза рудных полезных ископаемых являются:

- недостаточная обоснованность и «догматичность» научно-методологической базы прогнозирования (следствие: металлогения не стала существенным фактором прогнозирования рудных объектов);

- невысокая «прогностическая ценность» используемой информации, а так же её представление в слабых шкалах и низкая степень формализации;

- собственно прогноз в массе продолжает опираться на субъективные экспертные мнения, сложившиеся стереотипы, простейшие аналогии и почти не использует возможности математического моделирования, «добычи знаний» из

данных, методы и цифровые технологии преобразования знаний и числовой информации в прогнозные оценки недр.

В целом решение проблем прогнозной оценки недр (точнее, движение по пути решения проблем) предполагает:

- построение *моделей* и получение *знаний* об основных свойствах рудообразующих систем и их поведении в различных условиях;
- владение *информацией* о недрах (первичных и вторичных характеристиках геологической среды и геологических систем), позволяющей в принципе решать задачу прогноза тех или иных типов полезных ископаемых с определенной надежностью;
- существование и владение *технологиями*, преобразующими знания и информацию в прогнозную оценку недр.

1.2 Теоретико-методологические основы прогнозирования

В качестве *базовой аксиомы прогнозной оценки недр на рудные полезные ископаемые* можно принять следующее положение: *рудные объекты (месторождения, рудные поля, узлы, районы) являются не случайными, а специфическими геологическими образованиями, которые органично присущи земной коре и протекающим в ней процессам перераспределения вещества.* Несмотря на кажущуюся простоту и тривиальность, данная аксиома ставит под сомнение металлогенические построения, основанные на случайном совмещении факторов, механистическом их сложении (факторы надо не складывать, а «взвешивать» и структурировать) или использование гипотез *ad hoc* (гипотез «для данного случая»), типа «впрыскивании» металлов с больших глубин (хотя последнее не исключается).

Фундаментальной *физической основой* формирования и размещения рудных объектов в геологической среде, а, следовательно, и прогнозной оценки недр на рудные полезные ископаемые, является перемещение, дифференциация, ассоциация химических элементов, то есть их когерентное поведение (в частности, металлов имеющих низкие кларки концентрации). Оно происходит при иерархическом структурировании геологической среды в результате протекания в ней локально неравновесных процессов. только в таких условиях могут возникнуть устойчивые закономерности (связи) между элементами, структурами, свойствами и формироваться диссипативные структуры (рудные месторождения – типичные диссипативные структуры [1,2]).

Геологической основой прогнозной оценки недр на рудные полезные ископаемые является использование наработанных способов описания, вычленения, анализа объектов геологического пространства. Эти операции производятся по данным анализов содержания элементов, определениям минерального состава, картированию распределения горных пород, выделению по каким-то правилам формаций, зон, районов, замерам геофизических полей и т.д. Геологические основы оценки недр на рудные полезные ископаемые на разных масштабных уровнях рассмотрены в большом количестве работ [3-8 и многие другие].

Методология прогнозной оценки недр должна основываться на преобладающем типе поведения изучаемых систем или типе поведения, представляющим наибольший теоретический или прикладной интерес для решения конкретных задач. В металлогении наибольший интерес представляют системы и процессы с самоорганизацией, т.к. именно они обеспечивают структурное усложнение систем с понижением их энтропии, формирование устойчивых объектов в разнообразных условиях (именно к таким системам и объектам относятся рудообразующие системы и рудные месторождения) [9-13].

Явление самоорганизации, в очень упрощённом виде, можно пояснить как тип поведения систем в координатах воздействие (на систему) – результат (изменение системы) (таблица 1).

Типы поведения систем

Таблица 1

ВОЗДЕЙСТВИЕ	РЕЗУЛЬТАТ	
	<i>Не специфическое</i>	<i>Специфическое</i>
<i>Не специфическое</i>	Хаотичное	Самоорганизационное
<i>Специфическое</i>	Вероятностное	Детерминированное

Самоорганизационные процессы запускаются при конкуренции противоположных тенденций. Для геологической среды это могут быть диссипация и подвод тепла, электромагнитное отталкивание и притяжение частиц, растворение и осаждение, десорбция и сорбция, диффузия вещества (увеличение энтропии) и его концентрация (минимизация свободной энергии), деструкция сложных молекул и полимеризация (кластеризация), плавление и кристаллизация и т.д. Самоорганизация приводит к необратимому структурированию среды, что, в свою очередь, ведет к углублению и ускорению структурирования.

Принятие мировоззренческой модели самоорганизации в металлогенических системах влечет изменение методологии их изучения и интерпретации. Во-первых, необходимо учитывать пространственно-временную **автономизацию систем с самоорганизацией**. Автономизация происходит на всех иерархических уровнях и приводит к появлению ячеистых (мозаичных) и ритмичных структур. Автономизация указывает, что главное внимание нужно уделять внутренним особенностям, внутренней логике развития систем, хотя внешние причины в отдельных случаях могут быть решающими (особенно для разрушения систем). Во-вторых, желательно *отказаться от чисто детерминированных и/или вероятностных схем* и моделей образования и развития систем. В-третьих, нужно признать *отсутствие доминантных факторов*, влияющих на развитие систем с самоорганизацией. Главное не сила влияния какого-то фактора, а правильная архитектура воздействия на систему (среду). В-четвертых, необходимо обратить внимание на *нелинейные связи* (внутренние и внешние) и особенно на дискретную нелинейность и режимы с обострением. Отметим, что фиксировать нелинейные связи и эффекты мы можем только при использовании для описания свойств систем сильных шкал измерения (шкалы интервалов, отношений). И в-пятых, для

систем с самоорганизацией существуют *несколько путей развития* и поэтому их моделирование должно быть многовариантным.

Операционной основой прогнозной оценки недр на рудные полезные ископаемые является выявление и описание взаимосвязи (корреляции) свойств (характеристик) геологической среды. Здесь используется фундаментальный принцип: **корреляция кодирует информацию**. Применительно к прогнозированию рудных полезных ископаемых принцип корреляции означает выявление и описание силы и формы взаимосвязи целевых характеристик прогнозирования (Т) с «косвенными» (прогнозирующими) характеристиками (t) геологической среды. Формально в наиболее общем виде существование связи определяется следующим соотношением:

$$Q(T|t_i) = Q(T) \text{ при всех } t_i - \text{связи нет,}$$

$$Q(T|t_i) \neq Q(T) \text{ при любых } t_i - \text{связь существует,}$$

где $Q(T)$ – параметры (среднее, мода, дисперсия, ...) распределения характеристики Т; $Q(T|t_i)$ – условные параметры распределения характеристики Т в интервале i значений характеристики t .

Сила и форма связи между характеристиками геологической среды при прогнозировании рудных полезных ископаемых может оцениваться с помощью различных методов и критериев. Например, в «Многомодельном методе прогнозирования» используется оптимальное корреляционное отношение [14].

Важным основанием прогнозной оценки недр является **экономический** аспект, который часто остаётся без внимания или приносится в жертву «комплексности» и/или «опережающим исследованиям», оставшимися нам в наследство от времён «затратной» геологоразведки. Экономичность приближённо равняется количеству новой информации об объектах прогнозирования на единицу затрат (например, затрат на 1 кв.км.). Количество информации зависит от числа новых примерно ортогональных друг другу фиксируемых характеристик геологической среды и силе их взаимосвязи с целевыми характеристиками прогнозирования. Заметим, что вместо понятия «комплексность», под которой понимается получение информации различными способами (визуальным, аналитическим, приборным), давно пора использовать «системное описание». Последнее предполагает получение информации для описания объектов или процессов с разных позиций (вещественных, структурных, геометрических, физико-химических) и с учётом их принадлежности системам более высокого порядка и возможного разделения на подсистемы более низкого уровня.

Теоретической основой и базовой моделью рудообразования, объединяющей многие металлогенические гипотезы, может служить простое и содержательно ясное представление о формировании рудных объектов в результате перераспределения элементов «на месте» [15,16]. Такое перераспределение приводит к полярному структурированию полей концентрации, при котором рудные месторождения располагаются в областях накопления элементов (или их ближайшей периферии) (рис. 2). Возможности практического использования модели перераспределения с выделением металлогенических (рудообразующих) систем связаны с взаиморасположением областей выноса и

отложения рудного вещества в пространстве. В настоящее время доминирует тенденция помещать области мобилизации и выноса на большие глубины. в принципе такой подход не что иное, как объяснение ad hoc, т. е. «объяснение для данного случая». Но сейчас имеется множество фактов, свидетельствующих, что формирование рудных объектов происходит за счет металлов, извлекаемых из окружающих рудные объекты пород (более подробно этот вопрос рассмотрен во многих работах [17,18 и др.]). Предполагается, что перераспределение рудных, сопутствующих и других элементов происходит в геоэлектрохимических системах, хотя условия, особенности и механизмы этого перераспределения изучены недостаточно [19].

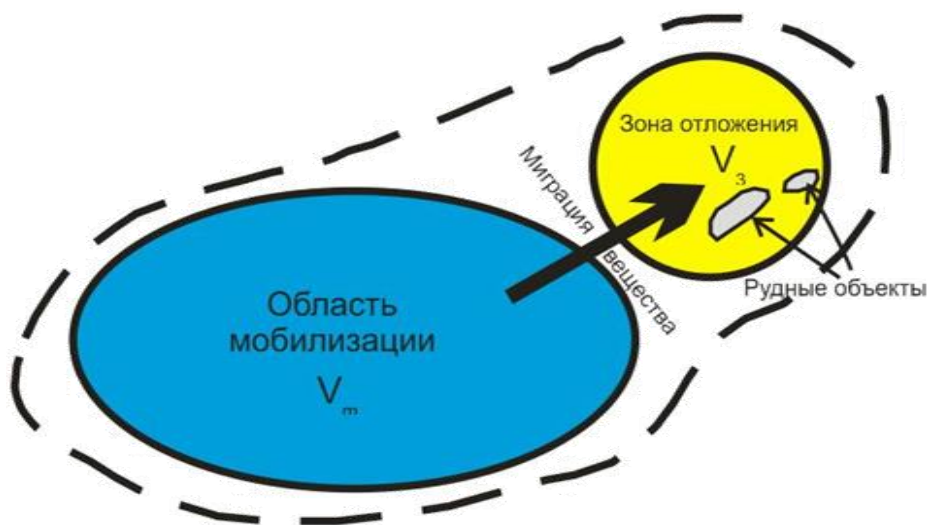


Рисунок 2. Базовая модель рудообразования в результате перераспределения элементов «на месте».

Направленность и интенсивность процесса перераспределения металла:

$\Delta H = H(V_m) - H(V_s)$, $H(V_m)$, $H(V_s)$ энтропия распределения металла в V_m и V_s , $+\Delta H$ – структурирование системы, накопление металла, $-\Delta H$ – деградация системы, рассеяние металла.

Из базовой модели рудообразования вытекает достаточно очевидное следствие об информационной основе прогнозирования рудных объектов: наиболее естественными, фундаментальными и информационно важными характеристиками геологической среды при поисках рудных объектов являются концентрации химических элементов. Картирование полей концентрации является наиболее прямым и естественным путем прогноза и поиска рудных объектов. Важно, что концентрации элементов являются настоящими физическими величинами, допускающими их объективное измерение, формализованное описание, оценку воспроизводимости, определение систематических и случайных отклонений. Существенно, что концентрации определяются в шкале отношений, в которой возможны все алгебраические преобразования и логические операции, а также то, что анализ распределения концентраций допускает детерминированную и вероятностную интерпретацию, позволяя гибко использовать широкий набор

математических методов и моделей, что открывает путь к количественной металлогении и цифровому прогнозированию.

Принятие концентраций химических элементов в качестве информационной основы прогнозирования рудных объектов не исключает, а иногда делает необходимым, использование данных о составе и структуре породных комплексов, геофизических полях и аномалиях, тектонических нарушениях и т.д. В недалёком будущем практический интерес для оценки недр, вероятно, будут представлять некоторые подходы и методы получения информации о физико-химических параметрах геологической среды [20,21 и др.].

1.3 Задача количественного (цифрового) прогнозирования

1.3.1 Постановка задачи количественного (цифрового) прогнозирования

Задачу прогноза полезных ископаемых можно формулировать различными способами, акцентируя при определении те или иные стороны этой многоступенчатой задачи. Задача прогноза ставится и решается на основе геологической, геохимической и геофизической информации, накопленной в картах, схемах, результатах анализа проб, аэрокосмических снимках, данных бурения и т.д.

Прогнозирование должно удовлетворять ряду условий:

- результат прогнозирования должен быть воспроизводимым;
- результат прогнозирования должен иметь меру с ясным геологическим и/или физическим смыслом;
- результат прогнозирования должен иметь пространственную привязку (чем она детальнее, тем ценнее результат);
- результат прогнозирования должен быть верифицирован;
- должны существовать и можно указать на способы априорной оценки ошибки и практической проверки результатов прогнозирования.

Формально задача прогнозирования полезных ископаемых представляет собой прямую геопризнаковую задачу (смотри раздел 1).

Задачу количественного прогнозирования, под которым понимается численное определение прогнозных ресурсов того или иного вида полезных ископаемых в тоннах, м³ и т.д., в наиболее общем виде удобно представить как задачу построения и вычисления функции, связывающей целевую характеристику (величину прогнозных ресурсов) с прогнозирующими:

$$P[T(Z)] = f \left[\left\{ t_j(Z) \right\}^p, \Theta \right],$$

где $P[T(Z)]$ – распределение целевой характеристики прогноза в точках с координатами Z ;

$t_j(Z)$ – j -тая прогнозирующая характеристика, являющаяся функцией пространственных координат Z ;

p – число прогнозирующих характеристик;

Θ – параметры.

Функция f строится на эталонном множестве (эталонном участке) $V_{\text{эт}}$; целевая характеристика прогноза T или $P[T(Z)]$ с помощью f определяется на площади (множестве) V , перспективность которой тербуется оценить. Схема построения f на $V_{\text{эт}}$ и определения $P[T(Z)]$ на V показана на рисунке 3.

Очень важно, чтобы математическое ожидание получаемых оценок целевой характеристики было не смещенным, т.к. это избавит прогнозирование от систематических ошибок.

Компьютерное моделирование на ряде тестовых и реальных примеров показало, что вид распределения $P(T)$ достаточно сложен и не симметричен, что необходимо учитывать при интерпретации результатов прогнозирования [9]. Кстати, значения аргументов функции f тоже достаточно часто имеют вероятностную природу и более строго должны обозначаться $P[t_j(Z)]$.

$$1) \quad P[T_1(Z)] = f_1 \left[\left\{ t_j \right\}^{P_1} \Theta \right]$$

$$\square \square \square \square \square \square \square \square \square \square ,$$

$$L) \quad P[T_L(Z)] = f_L \left[\left\{ t_j \right\}^{P_L} \Theta \right]$$

где T_1, \dots, T_L – целевые характеристики 1, ..., L – того уровня (регионального, локального, детального);

$\{t_j\}^{P_1}, \dots, \{t_j\}^{P_k}$ – прогнозирующие характеристики 1- L -того иерархического уровней (эти характеристики могут совпадать, частично совпадать или полностью отличаться друг от друга).

	ОБЛАСТЬ ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ – $V_{\text{эт}}$	ОБЛАСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ – V
ЗАДАЕТСЯ	1. $T(Z); \{T_j(Z)\}^P$ $Z \in V_{\text{эт}}$	3. $\{T_j(Z)\}^P, F$ $Z \in V$
ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ	2. $P[T(Z)] = F[T(Z); \{T_j(Z)\}^P, \Theta]$ $Z \in V_{\text{эт}}$	4. $P[T(Z)]$ $Z \in V$

Рисунок 3. Схема построения функции прогнозирования f и определения целевой характеристики прогноза.

1-4 – последовательность операций прогнозирования.

Понятно, что функции строятся отдельно для различных геолого-генетических типов месторождений (например, для меднопорфировых, медистых песчаников, медьсодержащих колчеданных и т.д.).

Поиск и описание связей между T и t_j , построение f для всех уровней и типов месторождений проводится на эталонном множестве (эталонной участке) $V_{\text{эт}}$, под которым понимается сравнительно хорошо изученная территория (пространственно связанная или несвязанная), в пределах которой имеются объекты прогнозируемого типа. Выбор $V_{\text{эт}}$ проводится геологами-экспертами с учетом некоторых общих требований:

- $V_{\text{эт}}$ должно содержать объекты прогнозируемого типа (желательно несколько и разных по размерам) и «пустые» участки, где T близко к 0;
- $V_{\text{эт}}$ по возможности должно содержать хотя бы один крупный рудный объект;
- $V_{\text{эт}}$ должно быть однородным с геологических позиций, т.е. в разных его частях (подмножествах) связи между T и t_j не должны слишком меняться;
- $V_{\text{эт}}$ должно быть представительным, что обозначает охват каких-то целостных структур или статистическую репрезентативность;
- $V_{\text{эт}}$ должно быть сравнительно хорошо изученным, т.е. у нас должна быть уверенность, что распределение T и t_j на нем существенно не изменится.

Кроме того, $V_{\text{эт}}$ должна быть в определенном смысле однородной (по форме связей T и t_j). Если в процессе вычисления связей (см. 2.3.4) выясняется их сложная форма и/или неоднородность корреляционных полей T - t_j по многим t_j , то необходимо прибегнуть к процедуре кластеризации данных и районированию, выделив в пределах $V_{\text{эт}}$ несколько однородных подобластей $V_{\text{эт}}^c \in V_{\text{эт}}$.

На $V_{\text{эт}}$ должны быть зафиксированы элементарные объекты описания v_j , которые условно считаются внутренне однородными и для которых T и t_j являются интегральными характеристиками. Размеры v_j обычно различны для различных t_j , т.е. $t_j = t_j(Z, v_j)$.

Таким образом, на $V_{\text{эт}}$ с достаточной надежностью должно быть определено распределение T и всех t_j , что дает возможность оценивать силу и форму связей T с t_j , проводить их селекцию и строить f . Во всех случаях при выполнении этих операций желательно использовать так называемый «нелокальный» подход, т.е. эмпирические данные, полученные на $V_{\text{эт}}$, дополнять и корректировать на основе привлечения знаний по другим регионам со сходным типом месторождений или даже чисто теоретическими представлениями. Построенная функция $P[T(Z)] = f[\{t_j(Z)\}^p, \Theta]$, $Z \in V_{\text{эт}}$ является моделью-эталонном для прогноза.

Вычисление T с помощью построенной функции производится на множестве (территории) V , перспективность которой требуется оценить подстановкой значений $t_j = t_j(Z)$, $Z \in V$ в f . При этом очевидно, что на V должно быть известно распределение всех t_j (в противном случае их не надо включать в эталон). Понятно, что $v_j \in V$ должна быть близка $v_j \in V_{\text{эт}}$.

Если целью прогноза является количественная оценка, то значение T должно определяться в числовой шкале и быть выражено в единицах, позволяющих

оценивать прогнозные ресурсы. Соответственно и большинство t_j должны оцениваться в сильных шкалах, так как нельзя получить надежную числовую оценку функции при номинальных значениях аргумента.

Как видим, прогноз полезных ископаемых состоит как бы из двух основных операций:

- построение модели-эталона определенного типа объектов полезных ископаемых и определенного масштабного уровня на $V_{\text{эт}}$;
- собственно прогноз на V .

1.3.2 Специфика решения задачи прогнозирования полезных ископаемых. Особенности геологической среды и геологических систем.

Содержательно и формально задача прогноза в геологии проста и достаточно прозрачна. Однако особенности геологической среды и геологических систем, с которыми мы имеем дело при прогнозе полезных ископаемых, делают эту задачу трудно решаемой и методически нетривиальной. Главными и наиболее общими особенностями геологической среды и геологической системы являются следующие:

1) Нелинейность и неоднородность геологической среды, что приводит к множественности типов взаимоотношений целевой и прогнозирующих характеристик и неинвариантности силы (ρ) и формы (λ) связи между ними относительно переноса в пространстве: $\rho(T, t_j) = \rho(Z)$, $\lambda(T, t_j) = \lambda(Z)$, Z пространственные координаты.

2) Иерархическая организация геологической среды и геологических систем (в частности систем, приводящих к образованию полезных ископаемых), в результате которой на каждом уровне действуют свои, в той или иной степени отличные от других уровней, закономерности.

3) Диффузность (или плохая организация) структуры и неравновесность большинства геологических систем. В таких системах трудно определить главные факторы развития, существенные свойства и даже выделить эти системы в пространстве (например, четко и однозначно оконтурить системы, которые мы называем рудным узлом, рудным полем, месторождением).

К этим естественным особенностям добавляется принципиальная неполнота информации о свойствах геологической среды и экономические ограничения (стоимость определения системы косвенных характеристик должна быть ниже стоимости прямого определения целевой характеристики).

Нелинейность среды приводит к нелинейности, немонотонности и даже многозначности связей между характеристиками, в том числе и между характеристиками, описывающими целевые и прогнозирующие (косвенные) свойства. Поэтому для анализа и описания связей не пригодны широко используемые коэффициенты корреляции (они определяют только силу линейной связи), а требуются методы и критерии, отражающие силу связи произвольной формы (например, корреляционное отношение, информационный коэффициент связи, коэффициент Чупрова и т.п.).

Особенно большие и принципиальные сложности прогноза полезных ископаемых связаны с неоднородностью геологической среды. Здесь мы имеем

ситуацию, принципиально отличную от ситуации, например, в физике, где все константы, параметры, закономерности инвариантны относительно переноса в пространстве и времени. В геологии установленные закономерности локализации какого-либо типа месторождений в определенной мере уникальны для каждого объекта, так как особенности свойств геологической среды также уникальны в каждой точке. Отсюда неинвариантность (или частичная неинвариантность) переноса этих закономерностей в пространстве. Отчасти неинвариантность связана с используемыми для описания геологической среды характеристиками. Сейчас это, в основном, описание внешних свойств геологических объектов и систем, которые не связаны прямо с процессами их образования, эволюции, структурирования.

Для смягчения влияния неоднородности геологической среды при построении прогнозирующей функции f и обоснования возможности ее использования на какой-либо территории желательно использование процедур кластерного анализа, районирования, с помощью которых выделяют относительно однородные площади и подмножества. Одним из простых показателей однородности $V_{эт}$ при построении целевой функции f является форма связи между T и t_j . Если эта форма простая (монотонно возрастающая, монотонно убывающая или имеющая один положительный экстремум), то $V_{эт}$ можно считать однородным относительно $\rho(T, t_j)$ и $\lambda(T, t_j)$ и строить целевую функцию f . В противном случае (при сложной форме связи T и t_j) $V_{эт}$ необходимо разделить на однородные подобласти (подмножества). Таким образом, процедуры классификации и районирования являются как бы базисными операциями прогноза, особенно когда прогнозирование ведется на больших площадях.

Иерархическая организация геологической среды и геологических систем приводит к тому, что на каждом масштабном уровне существуют свои объекты прогнозирования, свои прогнозирующие характеристики.

Литература к разделу 1

1. Летников Ф.А. Процессы самоорганизации при формировании магматических и гидротермальных рудных месторождений // Геология рудных месторождений. 1997, Т.38, №4, С. 307-322.
2. Лось В.Л. Теоретические, методические и технологические основы прогноза рудных объектов // Геонауки в Казахстане, Алматы, 2004, С. 228-239.
3. Щеглов А.Д. Основы металлогенического анализа. М., Недра, 1980, 432с.
4. Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. М., Недра, 1982, 669с.
5. Кривцов А.И. Прикладная металлогения. М., Недра, 1989, 288с.
6. Sillitoe R.N. 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circumPacific region. Australian Journal of earth Sciences, 44, 373-388.
7. Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gerbe-Mariam, M., Hagemann, S.G., and Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of

their crustal contribution and relationship to other gold deposit types: *Ore Geology Reviews*, v. 13, p. 7-21.

8. Старостин В.И. Металлогения. М., 2012, 560с.

9. Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992, 229 с.

10. Иванюк Т.Ю., Горяинов П.М., Егоров Д.Г. Введение в нелинейную геологию. Апатиты, 1996, 188 с.

11. Лось В.Л., Гоберник И.А. Самоорганизация геологических систем. Проблемы моделирования // Динамический хаос в распределенных системах. Алматы, 1997, с. 8-18.

12. Лось В.Л. Самоорганизация в геологических системах // Геология и охрана недр. Алматы, 2005. 1(4), С. 75-80.

13. Нарсеев В.А. Структурирование геологического пространства (в поисках новой парадигмы геологии).// Геология и охрана недр. Алматы, 2007, 1(22), С. 15-18.

14. Прогноз, поиски и моделирование рудных объектов // Комплексная переработка минерального сырья Казахстана. Том 1а. Алматы, 2008, 466с.

15. Гольдберг И.С., Абрамсон Г.Я., Лось В.Л. Геохимический образ рудных объектов – от региональных до локальных – основа прогноза и поисков месторождений по технологии «Ionex». Разведка и охрана недр, 2013, 8. С. 12-16.

16. Лось В.Л., Нарсеев В.А., Старостин В.И. Проблемы оценки недр на рудные полезные ископаемые // Геология и охрана недр . 2015, 1(54), С.67-78.

17. Бадалов С.Т. Геохимические особенности рудообразующих систем. Ташкент, 1999, 143с.

18. Goldberg, I.S., Abramson, G.J., and Los, V.L. Depletion and enrichment of primary haloes: their importance in genesis of and exploration for mineral deposits: *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2003, v.3, p. 281-293.

19. Гольдберг И.С. Рудообразование в геоэлектрохимических системах // Геология и охрана недр, 2005, 2(15)15. С. 28-40.

20. Лукманов М.А. Моделирование физико-химических характеристик геологического пространства для целей прогнозирования рудных полезных ископаемых. Алма-Ата, 1998, 30с.

21. Нарсеев В.А., Петровский А.Д. Нормализованные массэнергетические показатели комплексов среды рудоотложения. М., Изд. РАЕН, 1993, 45с.

2. Формирование теоретико-вероятностной модели переноса геохимического вещества на основе методологии статистической физики и физической химии. Разработка бета-версии программы оценки геохимических полей на глубине по данным поверхностного опробования.

Базовой моделью рудообразования, объединяющей многие металлогенические гипотезы, служит простое и содержательно ясное представление о формировании рудных объектов в результате перераспределения элементов «на месте» с полярным структурированием полей концентрации (геохимических полей). Из базовой модели рудообразования вытекает достаточно очевидное следствие: наиболее естественными, фундаментальными и информационно значимыми характеристиками геологической среды при прогнозировании рудных объектов являются концентрации химических элементов [1,2]. Отсюда и важность перехода к 3-х мерным геохимическим полям, т. Е. К решению обратных задач геохимии.

Очевидно, такой переход мог бы существенно расширить возможности существующих технологий прогноза, поиска и оценки месторождений полезных ископаемых. Однако, на настоящее время, использование трёх мерных моделей концентраций в поисковой геохимии на практике ограничено. И это прежде всего связано с получением такой информации как по экономическим соображениям, так и отсутствием, достаточно полной теоретической базы о законах рассеяния вещества в геологических средах. И как следствие отсутствие программных средств, которые позволяли бы получать трёх мерную структуру геохимических полей в геологическом пространстве на основе относительно дёшево получаемых данных поверхностного опробования на поисковое вещество.

В связи с изложенным, целью данной работы является разработка теоретических основ законов рассеяния вещества в геологических средах. А также соответствующей данной теории программного обеспечения, которое смогло бы осуществить процедуры экстраполяции данных поверхностного опробования на химические элементы в объём геологической среды для решения задач прогноза месторождений полезных ископаемых.

Ввиду сложности решаемой проблемы, на первом этапе данных исследований, была поставлено более простая задача. А именно, создать теоретическую основу масса переноса химических элементов в вещественно сложно структурированной геологической среде и соответствующей машинной программы, которая могла бы решать задачи выявления хотя бы механической структуры среды. Например, объёмные структуры химической проницаемости геологической среды. Получение такой расчётной информации, например, в результате использования в качестве первичной информации данных измерений подпочвенного состава природных газов над объектом исследования, могло бы быть полезным при поисках нефтяных месторождений. Кроме того позволило бы, на последующем этапах по теме, создать полноценную теорию и программу экстраполяции поверхностных геохимических полей в объём геологической среды.

Распределения наблюдаемых геохимических измерений показывают, что они образуют пространственно непрерывные множества, и в этом смысле, могут

рассматриваться как математические поля в объёме геологической среды. Принято считать, что в данной среде, в геологических масштабах времени, постоянно происходит перенос вещества из одних областей пространства, в другие области. Движущими силами данного процесса являются внутренние силы земли (в том числе и электрохимические). При этом макро рассеяние вещества осуществляется по каналам проницаемостей связанной пористости, которые по своим конфигурациям и протяжённостям могут быть сколь угодно странными. Это обусловлено тем, что связанная пористость геологической среды абсолютно случайная. Принятие таких допущений позволяет предположить, что любые две произвольные точки геологической среды могут быть соединены каналом проницаемости. Более того, таких каналов может быть сколь угодно много.

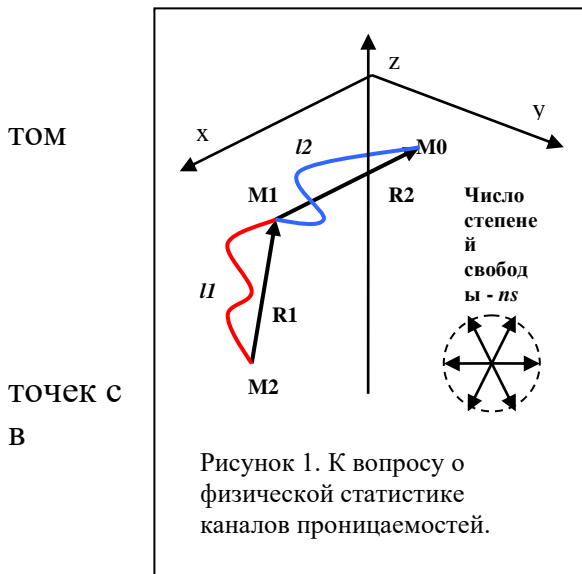
Динамика движения вещества зависит от его силового и геохимического взаимодействия со стенками каналов проницаемостей. Поэтому не все каналы проницаемостей, соединяющие две точки среды, находящиеся в масса обменном процессе, реализуются равновероятно на практике. Скорей всего вещество будет перетекать по каналу, длина которого наименьшая, поскольку в данном канале силы сопротивления движению будут минимальными. Эти рассуждения позволяют, чисто формально выявлять такие каналы, из всего их множества, основываясь на законах больших чисел.

Физическая статистика каналов проницаемостей.

Рассмотрим физическую статистику каналов проницаемостей в хаотически структурированной, по признаку проницаемых свойств, геологической среде (Рисунок 1).

Пусть некоторая точка дневной поверхности « $M0$ » имеет, через произвольную внутреннюю точку среды « $M1$ », гидродинамическую связь, в виде канала проницаемости, с точкой $M2$ в объёме среды.

Пусть эта связь осуществляется пространственно одномерными каналами проницаемостей длин « $l1$ » и « $l2$ ».



« $M1$ ».

Пусть также, в каждой точке среды, в числе и точках принадлежащих каналам проницаемостей, имеются « ns » степеней свободы масса переноса (возможных направлений движений вещества).

Проинтерпретируем точки геологической среды в виде физических линейными размерами « gb ». Далее, выделим геологической среде некоторую произвольную кривую, интерпретирующий некоторый абстрактный канал проницаемости, с началом, например, в точке

Тогда, согласно статистической независимости числа состояний точек выбранной кривой, как совокупности её точек, число состояний самой кривой можно будет выразить соотношением.

$$NM2 = \prod_{i=1}^{i2} ns_i = e^{\ln(ns1) \cdot i2} \quad i2 = \frac{l2}{rb} \quad ns_i = ns2 = \text{constant} \quad (1)$$

Где: $NM2$ – число состояний канала проницаемости длины « $l2$ », $ns2$ – число степеней свободы точек канала проницаемости соединяющего точки « $M1$ » и « $M0$ ».

Для того чтобы данная кривая «стала» каналом проницаемости необходимо, чтобы каждая точка данной кривой приобрела вполне определённое состояние. То есть направленность каждого элементарного вектора точек кривой, определяемого как элемент степени свободы, составил ломаную линию, интерпретирующий данную кривую.

Тогда, согласно теории вероятности, реализация канала проницаемости длины « l » в геологической среде должно определиться в виде функции:

$$w1(l) = \frac{A2}{NM1} = A2 \cdot e^{-\gamma2 \cdot l2} \quad \gamma2 = \ln(ns2) \quad (2)$$

Где $A2$ – нормировочный коэффициент определяемый из условия местонахождения второго конца канала проницаемости.

Предположим, что второй конец канала проницаемости (кривой) находится в точке « $M0$ ». Очевидно, что две точки « $M1$ » и « $M0$ » в идеале можно соединит бесконечным множеством кривых с длиной в пределах от $R2$ до ∞ . Поэтому, проинтегрировав первое выражение в (2) от $R2$ до ∞ и приравняв полученное значение единице (полная вероятность всех исходов событий равна единице) определим нормировочный коэффициент $A2$. $A2 = \gamma1 \cdot e^{\gamma2 \cdot R2}$, где $R2$ – наикратчайшее расстояние от точки « $M1$ » до точки « $M0$ »

Проведя те же рассуждения для каналов проницаемостей (кривых), соединяющих точку « $M2$ » и « $M1$ » определяем вероятность реализации канала длины « l » для этого случая.

Полученные выражения для вероятностей реализации каналов проницаемостей длины « l » подобны вероятностям отклонений термодинамических систем от стационарного состояния [3,4]. Так, например, величина $R2$ подобна энергии стационарного состояния, а величина « l » - избыточной энергии. Поэтому, следуя этой аналогии, величину обратную « $\gamma2$ » можно назвать шумовой температурой каналов проницаемостей соединяющих две произвольные точки геологической среды. В данной работе назовём шумовой температурой саму величину « γ » равную логарифму от числа степеней свободы в каждой точке геологической среды. С математической точки зрения величина « $\gamma2$ » определяет метрику наикратчайшего канала проницаемости.

Теперь рассмотрим канал проницаемости проходящий через три произвольные точки среды и имеющий длину « l ». Например, канал с началом отсчёта в точке « $M2$ » проходящий через точку « $M1$ » и заканчивающийся в точке

«M0». Этот канал можно рассматривать как сумму двух каналов с длинами «l1» и «l2». Тогда общая длина составного канала составит $l = l1 + l2$ (Рис.1).

Поскольку статистические состояния этих каналов вероятностно не зависимы, то вероятность реализации такого составного канала должна равняться произведению соответствующих вероятностей, то есть:

$$w0(l1, l2) = \gamma1 \cdot \gamma2 \cdot e^{-\gamma1 \left(\frac{l1 - R1}{rb} \right) - \gamma2 \left(\frac{l2 - R2}{rb} \right)} \quad (3)$$

Где $w0(l1, l2)$ – вероятность реализации канала длины $l = l1 + l2$, $\gamma1$ и $\gamma2$ – шумовые температуры первого и второго каналов проницаемостей, $l1$ и $l2$ – длины первого и второго каналов.

Энтропия такой системы каналов, согласно статистической теории физических систем, должна выражаться как логарифм от вероятностного состояния системы.

$$S0(l1, l2) = \ln[w0(l1, l2)] = -\gamma1 \cdot \frac{l1 - R1}{rb} - \gamma2 \cdot \frac{l2 - R2}{rb} + \ln(\gamma1 \cdot \gamma2) \quad (4)$$

$$l1 + l2 = l$$

Если считать рассматриваемый канал как единую систему, находящуюся в «термодинамическом» равновесии между своими частями, то её энтропия должна быть максимальной, то есть:

$$\begin{aligned} l1 + l2 = l \quad l = const \quad dl1 = -dl2 \\ \frac{\partial S0(l1, l2)}{\partial l1} = 0 \quad \gamma1 = \gamma2 \end{aligned} \quad (5)$$

С учётом (5) и (4) вероятность реализации канала длины «l» с началом отсчёта в точке «M2», проходящего через точку «M1» и заканчивающегося в точке «M0» можно будет выразить функцией плотности вероятностей вида:

$$w0(l) = \gamma0^2 \cdot e^{-\gamma0 \cdot \frac{l - R1 - R2}{rb}} \quad (6)$$

Знание плотности распределения по длинам каналов (6), согласно теоремам о среднем, позволяет оценить среднюю длину канала проницаемости, соединяющие три любые произвольные точки геологической среды « \bar{s} ».

$$\begin{aligned} \bar{s} &= \int_{\frac{R1+R2}{rb}}^{\infty} l \cdot w(l) \cdot dl = \gamma0^2 \cdot \int_{\frac{R1+R2}{rb}}^{\infty} l \cdot e^{-\gamma0 \cdot \frac{l - R1 - R2}{rb}} \cdot \frac{dl}{rb} = \\ &= \gamma0 \cdot (R1 + R2) + \frac{1}{\gamma0} \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, согласно выше приведённой оценке средней длины канала проницаемости, соединяющей три точки геологической среды эта длина определяется суммой эвклидовых расстояний между точками и шумовой температурой составного канала. Практически же можно считать, что данная длина равна:

$$\bar{s} = \gamma_0 \cdot (R1 + R2) \quad (8)$$

Поскольку $R1 + R2 \gg 1/\gamma_0$ если считать, например, что $R1$ эвклидово расстояние до источника вещества. Величина γ_0 имеет порядок значений единиц, при очень больших количествах степеней свободы движению в точках геологической среды.

Из выражения (8) следует, что в геологической среде, пространственная метрика усреднённых каналов проницаемостей (формально) отличается от физической метрики среды на величину γ_0 , а направление среднего канала в граничной точке, в случае рисунка 1, совпадает с направлением вектора $R2$.

Физическая постановка задачи.

Согласно изложенному представлению о каналах проницаемостей рассмотрим задачу о возможности создания алгоритмов решения обратной задачи геохимии, на основе представлений о пространственно одномерном переносе вещества в среде. Например, как это делается в лучевой сейсмике, основанной на представлениях о переносе сейсмической энергии вдоль одномерных лучей. В связи с этим, рассмотрим произвольный, пространственно одномерный канал проницаемости в проницаемой геологической среде в виде некоторой трубки тока, у которой линейные размеры сечения, выходящие на дневную поверхность, гораздо меньшие, чем длина самой трубки.

Предположим, что из-за пористости горных пород, в каждой точке объёма рассматриваемой трубки, на мигрирующее вещество, например – газ, действуют силы сопротивления движению пропорциональные, по модулю, скорости масса переноса.

Тогда, для движения вещества в такой трубке тока можно записать уравнение движения Эйлера и закон сохранения вещества в потоке.

$$\begin{aligned} c(s) \cdot V(s) \cdot \frac{dV(s)}{ds} &= -\frac{dp(s)}{ds} - b_0 \cdot V(s) \quad b_0 > 0 \\ c(s) \cdot V(s) &= Q \quad p(s) = \beta \cdot c(s) \quad \beta = \frac{R \cdot T}{\mu} \end{aligned} \quad (2)$$

Где s – длина наиболее вероятного канала проницаемости (от его начала до произвольной точки принадлежащей каналу). $c(s)$ – концентрация вещества на расстоянии s от начала отсчёта. $V(s)$ – скорость вещества в точке s . Q – поток вещества (для трубки тока $Q = \text{const}$). $p(s)$ – осмотическое давление вещества в точке s . b_0 – коэффициент пропорциональности между силам сопротивления

движению и скоростью. R – газовая постоянная. T – температура. μ – молярная масса вещества.

Можно показать, что решением уравнения (2) (при условии не значительной изменчивости температуры вещества вдоль трубки тока) является функция:

$$\ln(|V(s)|) + \frac{\beta}{2 \cdot V(s)^2} = d(s) \quad d(s) = b1 + \frac{b0}{Q} \cdot s \quad (3)$$

Анализ данного выражения показывает, что при уменьшении параметра $d(s)$, при возрастании длины канала, значения скорости становятся не однозначным. Если разрешить данную функцию относительно скорости, то одному и тому же значению параметра $d(s)$ будет соответствовать различные скорости. То есть, существуют две ветви решения. Первая ветвь решения предполагает убывание модуля скорости газа от значения $\sqrt{\beta}$, с увеличением расстояния от источника, до значения равным нулю на бесконечности. Вторая ветвь, предполагает, увеличение модуля скорости от значения $\sqrt{\beta}$ до бесконечности, с увеличением расстояния от источника газа вдоль канала проницаемости. Очевидно, физическому смыслу задачи удовлетворяет только первая ветвь решения. Согласно этому решению, скорость вещества в геологической среде не может превышать значения $\sqrt{\beta} = 7.527$ м/с ($T = 300^\circ\text{K}$) и убывать по мере удаления от источника вещества.

Для получения однозначного решения изменчивости скорости вещества вдоль канала проницаемости (3) необходимо задание граничных условий.

Для формирования этих условий воспользуемся следующими рассуждениями: Предположим, что в точке $(x0, y0)$ выхода канала проницаемости на дневную поверхность скорость истечения вещества (газа) в атмосферу равна $Vat(x0, y0)$, концентрация равна cat , а осмотическое давление Вещества (газа) в атмосфере pat . Соответственно, на границе (со стороны геологической среды) концентрация и давление вещества равны $c(x0, y0)$ и $p(x0, y0)$. Тогда, согласно уравнению Бернулли, на границе должно выполняться условие:

$$\begin{aligned} cat \cdot \frac{Vat(x0, y0)^2}{2} + pat &= p(x0, y0) \\ pat = \beta \cdot cat \quad p0(x0, y0) &= \beta \cdot c(x0, y0) \end{aligned} \quad (4)$$

Согласно закону сохранения вещества на границе геологической среды должно выполняться условие равенства потоков Вещества (газа) со стороны среды и атмосферы. То есть:

$$\begin{aligned} Q(x0, y0, cat) &= Qat(x0, y0, cat) \\ Q(x0, y0, cat) &= c(x0, y0) \cdot V(x0, y0) \quad Qat(x0, y0, cat) = cat \cdot Vat(x0, y0) \end{aligned} \quad (5)$$

Где $Q(x_0, y_0)$ – поток вещества (газа), поступающий к границе со стороны геологической среды, $Q_{at}(x_0, y_0)$ – поток вещества (газа), уходящий от границы среды в атмосферу, $V(x_0, y_0)$ – скорость вещества (газа), поступающий к границе со стороны геологической среды.

Подставляя выражение (5) в уравнение Бернулли (4) можно оценить величину потока вещества (газа) через границу.

$$Q(x_0, y_0, cat) = \begin{cases} \frac{1}{rb^2} \cdot \sqrt{2 \cdot \beta \cdot cat(x_0, y_0) \cdot [c(x_0, y_0) - cat]} & \text{if } c(x_0, y_0) \geq cat \\ \frac{1}{rb^2} \cdot \sqrt{2 \cdot \beta \cdot cat(x_0, y_0) \cdot [cat - c(x_0, y_0)]} & \text{if } c(x_0, y_0) < cat \end{cases}$$

(6)

Здесь учтено, что за точку дневной поверхности принята физическая точка с линейными размерами равными шагу опробования « rb ».

Для оценки значений концентрации cat и осмотического давления в атмосфере $\beta \cdot cat$ воспользуемся правдоподобным предположением о том, что в области границы опробования на вещество (газ) атмосфера и недра геологической среды находятся в динамическом равновесии. Иными словами, сколько Вещества (газа) вытекает из геологической среды в атмосферу, через профиль (площадь) опробования на дневной поверхности, столько и втекает в неё. Это означает необходимость выполнения следующего условия:

$$\iint_{Dopr} Q(x_0, y_0, cat) dx_0 \cdot dy_0 = 0 \quad (7)$$

Где $Dopr$ – область (профиль, профиль) опробования дневной поверхности, x_0, y_0 – координаты области опробования, $Q(x_0, y_0, cat)$ – поток вещества (газа) через границу.

Решая уравнение (7) относительно cat определяется давление, в ближайшем к границе дневной поверхности. в подпочвенном слое, давление, которое находится в равновесие с атмосферой. Эта концентрация, согласно расчётам, обычно близка к среднему содержанию вещества (газа) в приповерхностном слое дневной поверхности.

Подстановка решения уравнения (7) в выражение (6) однозначно определяет значение потока вещества (газа) в точках дневной поверхности. Скорость истечения вещества (поглощения) в точках дневной поверхности определяется условием сохранения потока в трубке тока согласно второму уравнению из (2).

$$V(x_0, y_0) = \frac{Q(x_0, y_0, cat)}{c(x_0, y_0)} \quad (8)$$

Для верификации константы b_0 продифференцируем выражение (3) по параметру s . Решая полученное уравнение относительно коэффициента b_0 и с учётом метрики (1), получим соответствующее выражение.

$$b_0(x_0, y_0) = Q(x_0, y_0) \cdot \left[\frac{1}{V(x_0, y_0)} - \frac{\beta}{V(x_0, y_0)^3} \right] \cdot \frac{dV(x_0, y_0)}{ds} \quad (9)$$

$$\frac{dV(x_0, y_0)}{ds} = \frac{1}{\gamma_1(x_0, y_0)} \cdot \frac{dV(x_0, y_0)}{dR_2} \quad R_2 = R_2(x_0, y_0, x, y, z)$$

Где $Q(x_0, y_0)$ – поток вещества (газа) через точку (x_0, y_0) дневной поверхности. $V(x_0, y_0)$ – скорость истечения вещества (газа) через точку (x_0, y_0) дневной поверхности. $dV(x_0, y_0)/ds$ – изменение скорости вещества (газа) в направлении s в точке дневной поверхности (x_0, y_0) совпадающим с направлением вектора $R_2(x_0, y_0, x, y, z)$. $R_2(x_0, y_0, x, y, z)$ – вектор соединяющий произвольную внутреннюю точку с координатой (x, y, z) с точкой на дневной поверхности (x_0, y_0) . R_2 – модуль вектора $R_2(x_0, y_0, x, y, z)$. $\gamma_1(x_0, y_0)$ – шумовая температура (метрика наиболее вероятного канала проницаемости) вектора $R_2(x_0, y_0, x, y, z)$.

Поскольку на практике поле опробования на дневной поверхности является дискретным полем, а изменчивость скорости в направлении вектора $R_2(x_0, y_0, x, y, z)$ должна оцениваться по гладкой функции, то при её вычислениях будет необходимо сглаживать исходное поле в окрестности точки (x_0, y_0) . Например, по трёхточечному алгоритму в случае профильного опробования, или по пяти точкам, в случае площадного опробования.

Шумовая температура $\gamma_1(x_0, y_0)$, (при расчётах изменчивости скорости на границе раздела сред), или иначе метрика канала проницаемости в точке (x_0, y_0) , определяется количеством ближайших поверхностных точек. Для 2D модели томографии 4 точки. Для 3D модели томографии 6 точек.

Согласно приведённому определению в работе [2] для понятия шумовая температура каналов проницаемостей в точке дневной поверхности (x_0, y_0) имеют место соотношения:

$$\begin{aligned} 2D - model \quad \gamma_1(x_0, y_0) &= \ln(4) \\ 3D - model \quad \gamma_1(x_0, y_0) &= \ln(6) \end{aligned} \quad (10)$$

Выражение (10), для метрики канала проницаемости на границе геологическая среда – атмосфера, позволяет рассчитать изменчивость скорости в направлении $R_2(x_0, y_0, x, y, z)$ для любой пары точек (x_0, y_0) (дневной поверхности) и (x, y, z) (точки в объёме среды). Эта изменчивость, далее, будет декларироваться как первая производная от скорости вдоль канала проницаемости соединяющий точки (x_0, y_0) и (x, y, z) .

В этом случае, данная производная может быть оценена как среднее по ансамблю 3 точек для 2D модели томографии, и 5 точек для 3D модели томографии. То есть:

$$\begin{aligned}
\frac{dV(x0, y0)}{ds} &= \\
\frac{1}{3} \cdot \sum_{i \neq 0}^3 \frac{V(x0_i, y0_i) - V(x0, y0)}{\gamma 1(x0, y0) \cdot [R(x0_i, y0_i, x, y, z) - R(x0, y0, x, y, z)]} & \quad 2D \text{ model} \\
\frac{dV(x0, y0)}{ds} &= \\
\frac{1}{6} \cdot \sum_{i \neq 0}^6 \frac{V(x0_i, y0_i) - V(x0, y0)}{\gamma 1(x0, y0) \cdot [R(x0_i, y0_i, x, y, z) - R(x0, y0, x, y, z)]} & \quad 3D \text{ model} \\
(11)
\end{aligned}$$

Где $V(x0, y0)$ – значение скорости в точке $(x0, y0)$ дневной поверхности. $V(x0_i, y0_i)$ – значение скорости в точках $(x0_i, y0_i)$, ближайших к точке $(x0, y0)$. $R(x0, y0, x, y, z)$ – расстояние от точки $(x0, y0)$ до точки $(x0, y0, x, y, z)$.

Подставляя выражение (11) в первое уравнение в (9) получаем значение коэффициента $b0(x0, y0, x, y, z)$ для каждой точки дневной поверхности, если в данную точку выходит канал проницаемости проходящий через точку в объеме среды с координатами (x, y, z) .

Для определения значений скоростей вещества (газа) в точках объема геологической среды, как следует из решения (3), помимо значения константы $b0$ необходимо знать и величины $b1$, а также s . То есть для этого необходимы какие-либо ещё два условия, которые могли бы следовать из данных опробования. Однако, в рамках выше описанной, детерминированной концепции теории таких условий нет. Поэтому, для придания однозначности в определении динамических характеристик масса переноса, введём в рассмотрение теоретико-вероятностное представление об образовании поля распределения скоростей вещественных (газовых) потоков в среде.

Как показал анализ поставленной задачи, применительно к геологическим средам, решение её определяется самой природой этих сред. Дело в том, что геологические среды являются случайно структурированными как по вещественному составу, так и по механическим свойствам. Поэтому, описание каких-либо физических процессов, которые могли бы в них протекать, с помощью детерминированных моделей, при не известности распределения в пространстве этих структур, бессмысленно. Тем более это касается моделей алгоритмов томографии основанных на измерениях в ограниченных областях исследуемой среды.

На основании выше сказанного, разовьём следующую теоретико-вероятностную концепцию для построения алгоритмов решения обратных задач геохимии.

Из решения (3) для скоростей масса переноса в точках геологической среды следует, что из любой произвольной точки (x, y, z) , находящейся в объеме среды, газ, в принципе, может попасть в любую точку $(x0, y0)$ дневной поверхности. Однако, исходя из физических соображений, ясно, что такое попадание не для всех

точек равновероятно. Очевидно, что большей вероятностью гидродинамической связи, между точками (x_0, y_0) дневной поверхности и точками в объёме среды (x, y, z) , обладают точки наиболее близкие к внутренней точке (x, y, z) .

В практике геохимических исследований полей концентрации, для выявления выше отмеченных связей используется понятие пространственный радиус корреляции. Согласно определению этого понятия, он оценивает размеры области в окрестности заданной точки, в точках которой значения концентраций позволяют вероятностно рассчитать концентрацию в отмеченной точке. Как показывают предварительные исследования, формально определение этих областей сводится к решению некоторого интегрального уравнения с заданным ядром. Данное ядро вводится аксиоматически. Его аналитический вид получают путём эмпирических, статистических исследований элементов на исследуемых полях геохимического опробования. Подробные исследования этой проблемы лежат за пределами данной работы. Они будут проведены позже. Здесь же ограничимся только общими принципами их оценки.

Практический анализ областей пространственной корреляции почти любых геохимических полей опробования дневной поверхности показывает, что на этой поверхности радиус корреляционной связи концентраций вещества в соседних точках очень мал. А именно, концентрации вещества, отобранные в технологически обоснованном объёме пробы, в соседних точках, могут существенно отличаться. Этот факт указывает на то, что количественная связь вещества в точках среды имеет место в основном в вертикальном направлении, если конечно предположить, что геохимические ореолы образуются в результате перераспределения элементов в земной коре. В этом случае радиус пространственной корреляции в трёхмерном пространстве (с внутренними точками геологической среды) становится большим по абсолютному значению. Следовательно, растут и размеры области на дневной поверхности, с которыми коррелированы по концентрации глубинные точки среды, хотя корреляция наблюдаемые концентрации между соседними точками самой границы остаются малыми по значению.

Приведённые выше замечания по пространственному радиусу корреляции позволяют создать количественный алгоритм (в линейном приближении) выделения областей корреляционной связи на границе раздела сред, а следовательно и гидродинамической связи в моделях процесса масса переноса, точек дневной поверхности с точками в объёме геологической среды.

Рассмотрим две точки геологической среды $M1(x, y, z)$ и $M0(x_0, y_0)$ геологической среды. Первая точка принадлежит объёму среды, вторая точка – границе раздела сред (дневной поверхности).

Предположим, что, в линейном приближении относительно координаты «z», проекция пространственного радиуса корреляции на плоскость поверхности опробования имеет вид:

$$r_{\text{пов}}(x, y, z, x_0, y_0) = a \cdot z + b \quad (12)$$

Где $r_{\text{rov}}(x,y,z,x_0,y_0)$ – проекция радиуса корреляции на дневную поверхность, a и b – некоторые постоянные подлежащие определению.

Предположим, что точка $MI(x,y,z)$ совпадает с точкой $MO(x_0,y_0)$. Тогда, согласно выше изложенному, а именно, проекция пространственного радиуса корреляции на плоскость границы раздела сред должна равняться минимальному расстоянию от точки $MI(x,y,0)$ до ближайшей точки. При дискретном опробовании это расстояние равно шагу опробования. Следовательно, согласно (19), $b = rb$, где rb шаг опробования.

Оценку коэффициента « a » проведём исходя из следующих соображений:

Глубина и разрешающая способность любого метода оценки параметров физических процессов зависит от объёма исходной информации. Применительно к данному случаю это количество точек опробования и расстояние между ними. Очевидно, чем длиннее профиль (площадь) опробования, и чем меньше шаг опробования, тем глубже и точнее можно будет экстраполировать динамические характеристики масса переноса вещества.

Представляется оправданным считать, что адекватная экстраполяция динамических характеристик, полученных на границе раздела сред, на глубину среды не может превышать половины длины профиля, или максимального размера одной из сторон границы площади опробования (3-D томография). Это даёт основание принять условие, что проекция радиуса корреляции, для крайней точки области корреляции, на дневную поверхность не должна превышать отмеченных размеров. Выполнение этого условия даёт аналитическую зависимость для (12) в виде:

$$r_{\text{rov}}(z) = \left(1 - \frac{2}{L_0}\right) \cdot z + rb \quad (13)$$

Где L_0 – длина профиля опробования в случае для алгоритма 2-D томографии, или максимальный линейный размер на площади опробования в случае 3-D томографии; rb – шаг опробования.

Физический смысл выделения области на дневной поверхности в окрестности точки $x_0=x$, $y_0=y$ в пределах радиуса r_{rov} заключается в том, что в точках данной области на дневную поверхность с наибольшей вероятностью выходят, допустимые процессом масса переноса, каналы проницаемостей, начало которых лежит в точке (x,y,z) .

Совокупность данного множества каналов проницаемостей физически можно рассмотреть как виртуальную трубку тока с вершиной в точке (x,y,z) , состоящую из отдельных, более тонких трубок тока, каждая из которых случайно, с равной вероятностью, может быть реализована в физическом процессе масса переноса. Тогда, множество состояний такой системы можно характеризовать как статистический ансамбль состояний [3,4].

Повторяя все рассуждения, применённые к расчёту средней длины каналов проницаемостей, но уже для количества состояний случайного вектора R_2 , можно

оценить и значение для его шумовой температуры. В этом случае, шумовая температура, а соответственно и метрика канала минимальной длины, соединяющего точку в объёме среды $MI(x,y,z)$ с точкой $M(x_0,y_0)$ на дневной поверхности, должна определяться выражением:

$$\gamma_0(x_0, y_0, x, y, z, r_{pov}) = \ln(N_{Drpov}) \quad (14)$$

Где N_{Drpov} – количество точек на дневной поверхности попадающих в область ограниченную проекцией пространственного радиуса корреляции в точке (x,y,z) .

В качестве примечания следует отметить, принятие условия о рекомендациях, при оценке коэффициента «а» в (12), не носят «жесткий» характер. Поскольку, как показали последующие испытания программы, они не существенно оказывают влияние на конечный результат расчётов. То есть топология выявляемых аномалий не существенно меняется.

Исходными данными для осуществления процедур решения задачи являются данные профильного, или площадного опробования участков дневной поверхности. В решении же (3) координата s отсчитывается от виртуальной границы, где скорость равняется $\sqrt{\beta}$. Место положения данных границ, для различных каналов проницаемостей, имеющих выход на дневную поверхность, различны. Поэтому, с целью отказа от поиска местоположения таких начальных точек, гораздо удобней начала отсчёта параметра « s » вести от точек на дневной поверхности, которые всегда формально можно зафиксировать.. В связи с этим введём новую систему отсчётов, для которых нулевые значения длины каналов проницаемостей начинаются в заданных точках дневной поверхности (x_0,y_0) . В этом случае выражение (3), с учётом (14) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} b_1 + \frac{b_0(x_0, y_0, x, y, z)}{Q(x_0, y_0)} \cdot s_0 &= \ln(|V(x_0, y_0)|) + \frac{\beta}{2 \cdot V(x_0, y_0)^2} \\ b_1 + \frac{b_0(x_0, y_0, x, y, z)}{Q(x_0, y_0)} \cdot (s_0 - \Delta s) &= \ln(|V(x, y, z)|) + \frac{\beta}{2 \cdot V(x, y)^2} \\ \Delta s &= \gamma_0(x_0, y_0, x, y, z, r_{pov}) \cdot \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2} \end{aligned} \quad (15)$$

Где s_0 – средняя длина канала вектора $R1$, определяющего местоположение точки (x,y,z) . Δs – длина канала $R2$ (расстояние от точки на поверхности до точки в объёме среды). $V(x_0,y_0)$ – скорость истечения газа в точке (x_0,y_0) дневной поверхности. $V(x,y,z)$ – скорость газа в точке (x,y,z) в объёме геологической среды.

Вычитая из первого уравнения в (15) второе, находим уравнение связи между скоростями в объёме среды со скоростями на дневной поверхности как функции от расстояния между ними.

В данной системе уравнений константа $b_0(x_0,y_0,x,y,z)$ для каждого из каналов проницаемостей соединяющих точки (x_0,y_0) и (x,y,z) известны согласно расчёту по выражениям (9) и (11). Тогда константу $b_2(x,y,z)$, являющуюся функцией скорости

газа в точке объёма среды, можно рассчитать как среднее значение по ансамблю состояний виртуальной трубки тока. Алгоритм усреднения основывается на том, что вероятность выхода, каждого канала проницаемости из виртуальной трубки в область на дневной поверхности ограниченной сечением виртуальной трубки тока, имеет равновероятное значение.

$$\begin{aligned}
 b2(x, y, z) &= \ln(|V(x0, y0)|) + \frac{\beta}{2 \cdot V(x0, y0)^2} - \\
 &- \frac{\Delta s(x0, y0, x, y, z, rpov)}{Q(x0, y0)} \cdot b0(x0, y0, x, y, z) \\
 \Delta s(x0, y0, x, y, z, rpov) &= \gamma0(x0, y0, x, y, z, rpov) \cdot \\
 &\cdot \sqrt{(x - x0)^2 + (y - y0)^2 + z^2} \\
 b2(x, y, z) &= \ln(|V(x, y, z)|) + \frac{\beta}{2 \cdot V(x, y)^2}
 \end{aligned} \tag{16}$$

При формировании ансамбля состояний каналов проницаемостей, для организации процедур усреднения, необходимо учитывать, то, что не все каналы ансамбля виртуальной трубки удовлетворяют условию их физической допустимости. Эти условия, формально, диктуются выполнением условий $b2 > 0$, $b0 > 0$. Это утверждение, в свою очередь, следует из физических соображений о том, что силы сопротивления движению газов в пористой среде, всегда направлены против направлений скорости, в не зависимости от его знака. Поэтому, перед нахождением среднего по ансамблю состояний величин $b2(x, y, z)$ и $b0(x0, y0, x, y, z)$, выделяется их множество значений в ансамбле, удовлетворяющее отмеченным условиям, которые и принимаются как допустимыми значениями в рассматриваемом процессе переноса вещества.

Скорость, в точке объёма среды, определяется решением последнего уравнения в (16) относительно функции $V(x, y, z)$ при рассчитанном ранее значении $b0(x0, y0, x, y, z)$ и после расчета по выше отмеченному алгоритму отыскания условного среднего для $b2$ по ансамблю.

Выше было отмечено, что каналы проницаемостей виртуальной трубки тока, с вершиной в точке (x, y, z) , с равной вероятностью могут иметь выход в точки $(x0, y0)$ дневной поверхности в пределах проекции пространственного радиуса корреляции на неё. Следовательно, значение потока газа в точке (x, y, z) можно рассчитать, ввиду закона сохранения вещества, как среднее от значений потоков в точках области ограниченной радиусом корреляции.

$$Q(x, y, z) = \frac{1}{N_{Drpov}} \cdot \sum_{i \in Drpov} Q(x0_i, y0_i) \tag{17}$$

Где $Q(x,y,z)$ – значение потока в точках объёма среды. $Q(x0_i,y0_i)$ – значения потока в точках дневной поверхности в области ограниченной проекцией пространственного радиуса корреляции на эту поверхность. N_{Drpov} – количество точек в области корреляции на дневной поверхности. $Drpov$ – область на дневной поверхности ограниченная линейными размерами проекции пространственного радиуса корреляции.

Поскольку на дневную поверхность выходят каналы проницаемости как восходящих, так и нисходящих потоков вещества, то в произвольной внутренней точке геологической среды значения $Q(x,y,z)$, согласно (17), могут быть как положительными, так и отрицательными величинами. Положительные значения $Q(x,y,z)$ соответствуют восходящим потокам газа, отрицательные – нисходящим потокам.

Очевидно, знак скорости вещества в потоке должен совпадать со знаком потока. Поэтому, распределение скорости в объёме среды должен определиться, согласно последнему уравнению в (16), выражением:

$$V(x, y, z) = \text{sign}(Q(x, y, z)) \cdot V1(b2(x, y, z)) \quad (18)$$

Где $V1(b2(x,y,z))$ – зависимость скорости вещества от расчётного коэффициента $b2(x,y,z)$.

Распределение концентрации вещества в среде можно определить исходя из второго уравнения в (2), то есть:

$$C(x, y, z) = \frac{Q(x, y, z)}{V(x, y, z)} \quad (19)$$

Распределение значений проницаемостей в геологической среде оценим исходя из определения её в законе Дарси, а именно:

$$V(x, y, z) = \frac{\lambda(x, y, z)}{\mu\nu} \cdot \text{grad}(p(x, y, z)) \quad (20)$$

Где $\lambda(x,y,z)$ – значение проницаемости геологической среды в точке (x,y,z) , $\mu\nu$ – вязкость вещества, $\text{grad}(p(x,y,z))$ градиент давления в точке (x,y,z) .

С учётом того, что $p(x,y,z) = \beta \cdot C(x,y,z)$, (9), (11) и (20) находим пространственную зависимость коэффициента проницаемости $\lambda(x,y,z)$.

$$\lambda(x, y, z) = \frac{\mu\nu}{\beta \cdot b0(x, y, z)} \cdot [\beta - V(x, y, z)^2] \quad (21)$$

Таким образом, совокупность функций (18) – (21), определяют теоретико-вероятностные распределения кинематических характеристик переносимого

вещества в пространстве геологической среды, а также позволяют оценить структуру проницаемых свойства самой среды. Поскольку эти распределения получаются на основе измерений концентрации вещества в точках дневной поверхности, то разработанный алгоритм можно отнести к алгоритму экстраполяции поверхностных измерений в объём среды.

Данная технология решения обратной задачи газовой геохимии была реализована в виде машинной программы в системе «MATHCAD» и опробована на результатах профильной съёмки на CO₂ территории одного из институтов, а также площадной съёмки над ядерной полостью №1010 СИП.

Результаты томографии этих объектов приведены на рисунках (1) – (8).

Как видно из приведённых рисунков, разработанная теоретическая конструкция решения обратной задачи газовой геохимии в версиях 2-D и 3-D моделей, позволяет выделять в геологической среде различные структуры по различным характеристикам массопереноса вещества.

Анализ томографических процедур, по выявлению отмеченных структур, на реальных полях (профилях) опробования показывает, что они проявляются в основном в распределениях расчётных полей вещественного потока, концентраций и проницаемостей.

Поля распределения скорости в объёме среды относительно однородны. Их изменчивость проявляется только в приповерхностных слоях земли. Это, по-видимому, связано с тем, что локальный рельеф в большей степени подвержен эрозии по сравнению с недрами, следовательно, изменчива и микро градиентная структура связанной пористости.

На профиле 1, рисунки 1 в, г, д, чётко выделяются структурные неоднородности по признакам потока, концентрации и проницаемости. В частности, на левом и правом флангах профиля отмечаются восходящие потоки газа. В центральной части профиля эти потоки являются нисходящими.

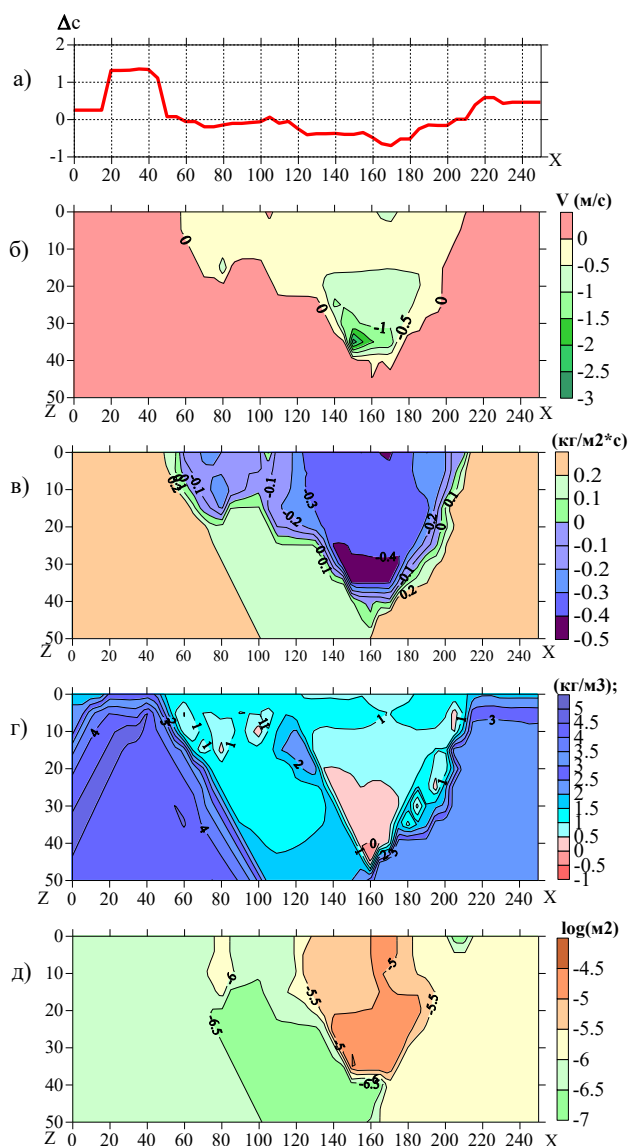
Соответственно, в этих областях отмечается и повышенное содержание подвижной фазы газов. На левом фланге профиля, в среде выделяется наклонная линза повышенной концентрации, рисунок 1г. Восходящие потоки в основном сконцентрированы на левом фланге профиля, рисунок 1в. В целом модули градиента потока и концентрации проявляют изменчивость в латеральном направлении.

Проницаемая структура геологической среды под профилем 1 меняется в широких пределах от 10^{-4} м^2 до 0 м^2 . Поэтому, визуализация распределения этого признака в объёме среды осуществлена в логарифмическом масштабе.

В целом, с увеличением глубины проницаемость среды убывает, что, например, заметно наблюдается по данным расчёта проницаемости во вмещающих ядерную полость породах, рисунки 1 – 5. Это качественное замечание согласуется с выводами, приведёнными в работе [3].

На рисунке 3а, показано сглаженное, площадное поле опробования на CO₂ над ядерной полостью №1050, на основе которой проведены процедуры томографии вмещающей полость геологической среды. Результаты решения обратных задач визуализированы в виде разрезов по вертикальным плоскостям различной

ориентации показанных, в соответствии с рисунком 3г (проекция пересечения плоскостей проходит через боевую скважину).



а — значения изменения концентрации относительно атмосферного содержания (kg/m^3),

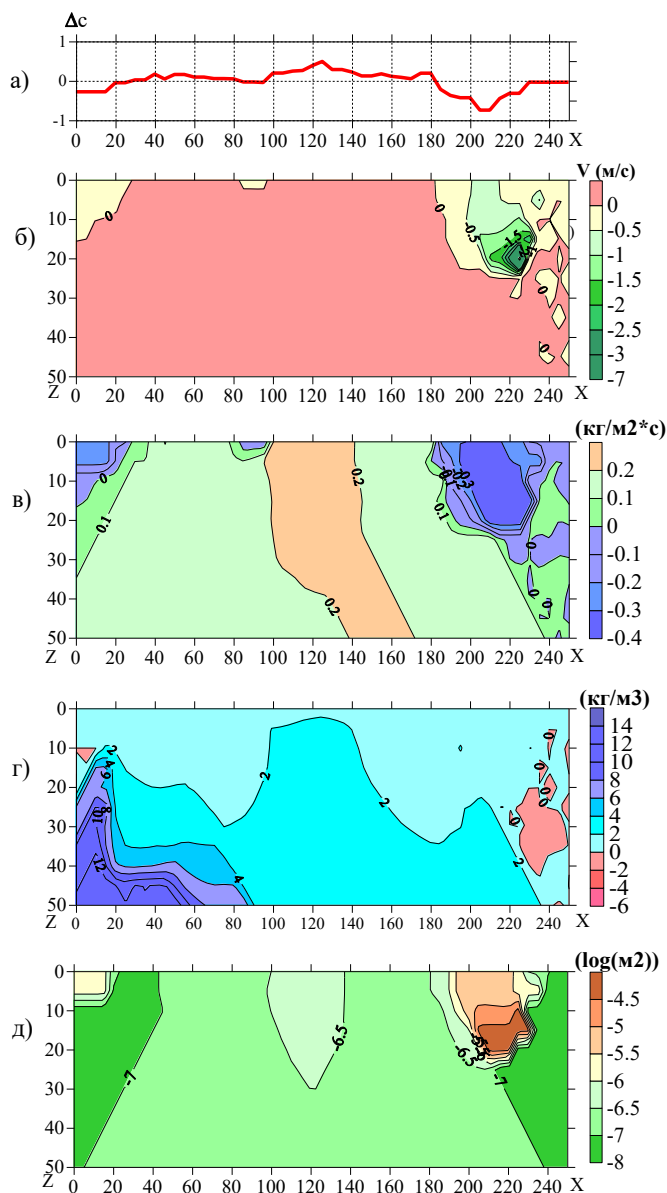
б — скорости газа в точках объёма среды (m/s),

в — значения потока вещества (CO_2) в точках объёма среды ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$),

г — значения концентрации подвижной фазы вещества (CO_2) в объёме среды (kg/m^3),

д — значения логарифма проницаемостей в точках объёма среды ($\log(m^2)$).

Рисунок 1 - Профиль 1. Распределения характеристик массопереноса вещества (газа CO_2) в зависимости от глубины



а – значения изменения концентрации относительно атмосферного содержания (kg/m^3),

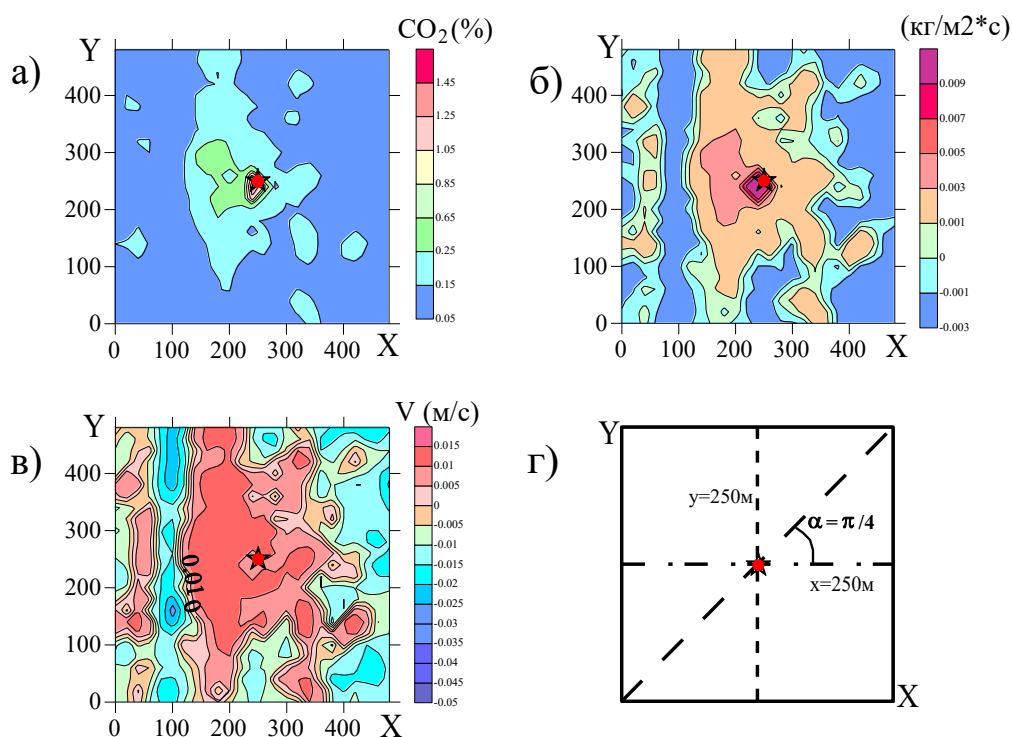
б – скорости газа в точках объёма среды (m/s),

в – значения потока вещества (CO_2) в точках объёма среды ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$),

г – значения концентрации подвижной фазы вещества (CO_2) в объёме среды (kg/m^3),

д – значения логарифма проницаемостей в точках объёма среды ($\log(m^2)$).

Рисунок 2 - Профиль 2. Распределения характеристик массопереноса вещества (газа CO_2) в зависимости от глубины



а – исходное, сглаженное поле концентрации вещества (CO_2) над ядерной полостью №1010,

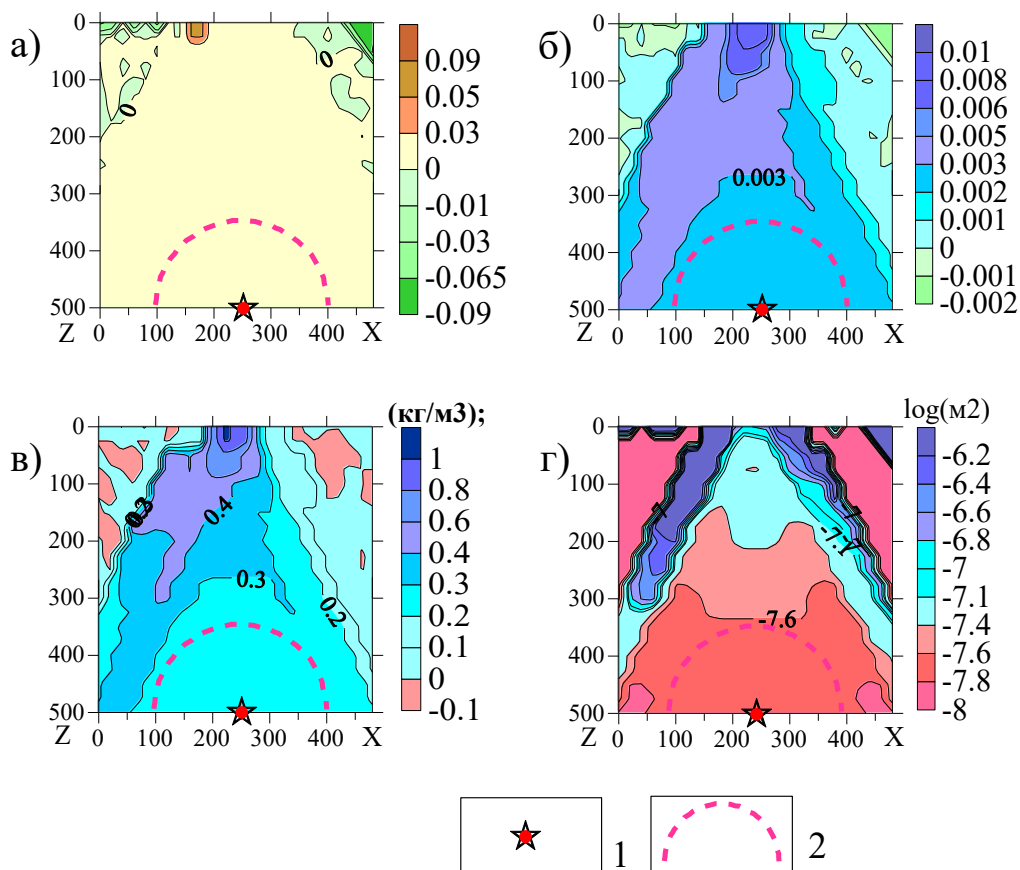
б – расчётное поле потока вещества (CO_2) над ядерной полостью,

в – расчётное поле скорости истечения вещества (CO_2) с поверхности опробования,

г – схема плоскостей разрезов на которых рассчитываются динамические характеристики переноса вещества (CO_2).

Рисунок 3 - Скважина 1010. Томографические результаты

На рисунках 3б и 3в, показаны распределения потока истечения и скорости вещества (газа) через дневную поверхность, рассчитанные на основе данных опробования на концентрацию и на основе уравнения Бернулли. Эти исходные данные к реализации процедур томографии являются граничными условиями для теоретического описания движения газа в пористой среде.



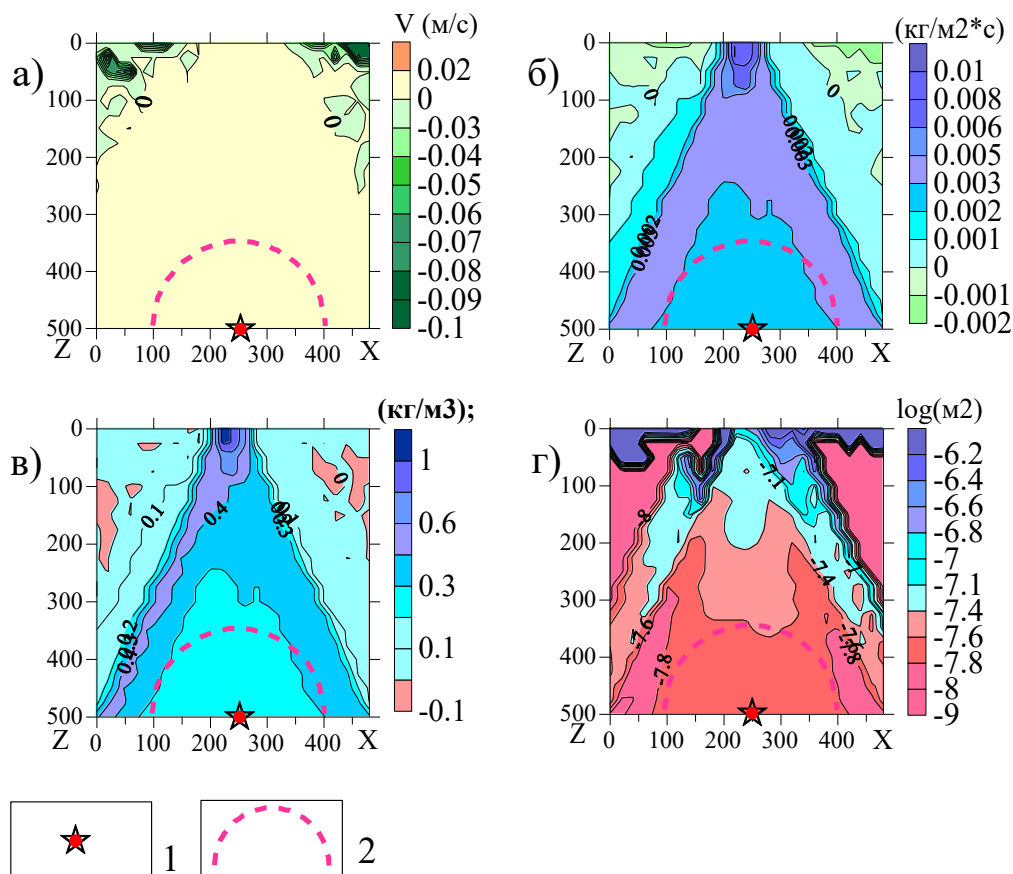
1 - местоположение гипоцентра взрыва;
2 - границы наведённой взрывом трещиноватости.

а – распределение значений скорости в плоскости разреза среды (m/c),
б – распределение потока газа в плоскости разреза среды ($кг/м^2 * c$),
в – распределение значений концентраций вещества (CO_2) в плоскости разреза среды ($кг/м^3$),
г – распределение значений логарифма проницаемостей в плоскости разреза среды ($log(m^2)$)

Рисунок 4 - Боевая скважина №1010.
Разрез геологической среды по плоскости $y=250$ м

На рисунке 4, показаны результаты расчёта динамических характеристик переноса вещества (газа), в проекциях отмеченных, в соответствии с рисунком 3г разрезов.

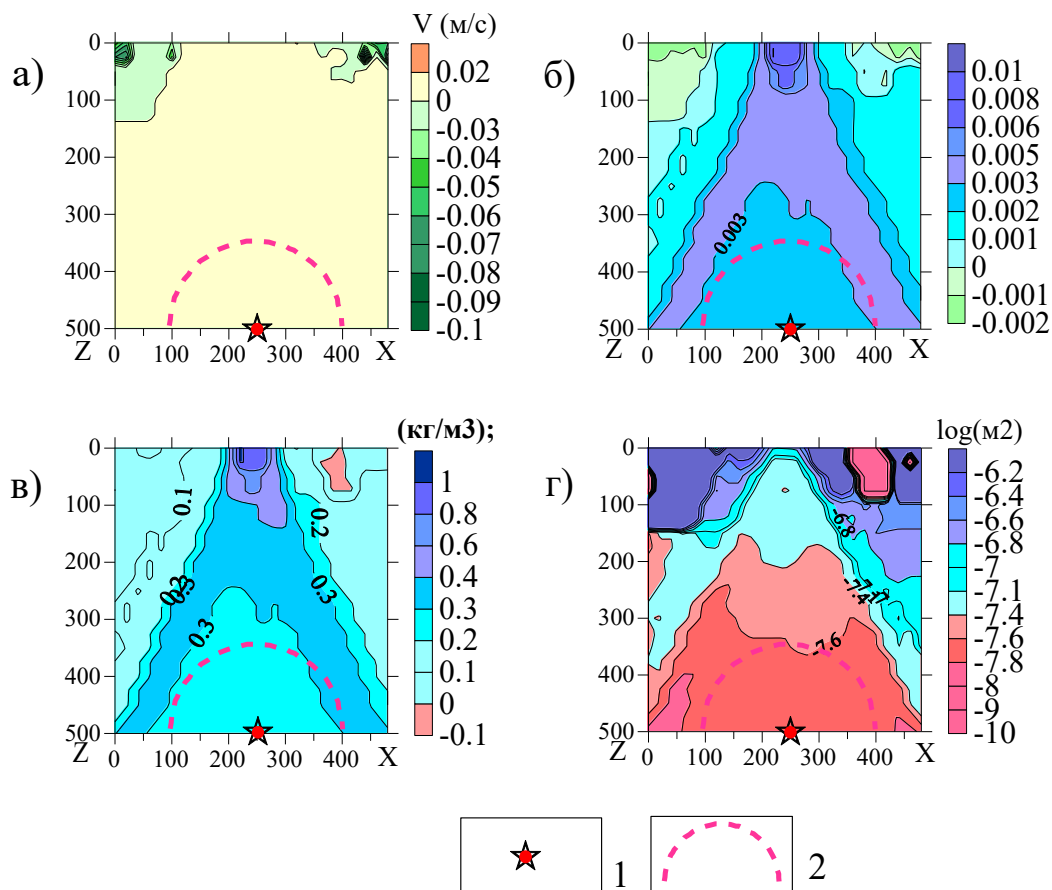
Как видно из рисунков 4а, 5а и 6а поле скоростей относительно однородно по разрезам. Структурированность этого поля проявляется только в приповерхностных слоях геологической среды.



1 - местоположение гипоцентра взрыва;
2 - границы наведённой взрывом трещиноватости.

а – распределение значений скорости в плоскости разреза среды (m/s),
б – распределение потока вещества (CO_2) в плоскости разреза среды (kg/m^2*s),
в – распределение значений концентраций вещества (CO_2) в плоскости разреза среды (kg/m^3),
г – распределение значений логарифма проницаемостей в плоскости разреза среды ($log(m^2)$).

Рисунок 5 - Боевая скважина №1010.
Разрез геологической среды по плоскости $x=250$ м



1 - местоположение гипоцентра взрыва;
2 - границы наведённой взрывом трещиноватости.

а – распределение значений скорости в плоскости разреза среды (м/с),
 б – распределение потока вещества (CO_2) в плоскости разреза среды ($\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$),
 в – распределение значений концентраций вещества (CO_2) в плоскости разреза среды (кг/м^3),
 г – распределение значений логарифма проницаемостей в плоскости разреза среды ($\log(\text{м}^2)$).

Рисунок 6 - Боевая скважина №1010.
Разрез геологической среды по плоскости $\alpha=\pi/4$

На всех разрезах поле восходящего потока газа как бы обтекает область наведённой взрывом трещиноватости, сужаясь на малых глубинах к устью боевой скважины. Нисходящие же потоки газа наблюдаются по перифериям разреза.

На всех разрезах в окрестности ядерной полости и области наведённой трещиноватости отмечается небольшое повышение проницаемости на фоне его естественного убывания. Это аномальное повышение становится явным на верхних горизонтах среды, в ближайшей окрестности боевой скважины. Расчётные структуры проницаемости геологической среды в целом ассиметричны и приурочены к оси боевой скважины.

Таким образом, разработанная методика решения обратной задачи газовой геохимии позволяет отслеживать проницаемые свойства геологической среды и, в частности, может быть использована для мониторинга земных недр с целью использования расчётной информации в технологиях поиска нефтяных и газовых и рудных месторождений.

Литература к разделу 2.

1. Лось В.Л., Усманов Ф.А., Гольдберг И.С. и др. Прогноз, поиски и моделирование рудных объектов // Комплексная переработка минерального сырья Казахстана. Том 1а. Алматы, 2008, 466с.
2. Лось В.Л., Мурзадилов Т.Д. Концепция и методология нового технологического «мейнстрима» прогнозно-поисковых работ на рудные полезные ископаемые. Геология и охрана недр.2018, 3(68), С.58-67
3. Жариков. А.В., Шмонов В.М., Витовтова В.М. Проницаемость, структура порового пространства и динамика движения природных и техногенных флюидов в кристаллических породах (по экспериментальным данным). Вестник ОНЗ РАН, том 3, NZ6029, doi: 10.2205/2011NZ000159, 2011.

3. Программа (в стандартах ПК Elan) расчёта физико-химических параметров геологической среды по данным силикатных анализов.

Разработана и апробирована программа расчёта физико-химических параметров геологической среды (энтропия, энтальпия, теплоёмкость, энергия Гиббса, окислительно-восстановительный потенциал) по данным силикатных анализов или по соотношению «стандартных» (входящих в принятый алфавит) горных пород [1].

Исходными данными для построения моделей пространственного распределения физико-химических характеристик геологического пространства служат силикатные анализы: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , CO_2 (см. таблицу 1).

Значение CO_2 вычисляется как:

$$CO_2 = 100 - (SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO + CaO + Na_2O + K_2O + P_2O_5) \quad (1).$$

Таблица 1. Фрагмент исходных данных для вычисления физико-химических характеристик.

14													
<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>n</i>	<i>SiO₂</i>	<i>TiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>FeO</i>	<i>MnO</i>	<i>MgO</i>	<i>CaO</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>	<i>P₂O₅</i>
74,7	49,2	29	72,57	0,33	13,7	1,36	1,48	0,05	0,45	1,07	3,62	4,74	0
74,5	49,2	27	61,18	0,94	16,68	4,02	1,94	0,14	1,69	3,58	3,88	3,87	0
75,1	49,3	3	75	0,16	13,39	0,6	1	0,05	0,11	0,86	3,52	4,4	0
...

В таблице 1 приведен пример фрагмента входного файла исходных данных для вычисления физико-химических характеристик.

Опираясь этим окисным составом в элементарных блоках, имеется возможность определять значения физико-химических свойств геологического пространства. Для расчета значений энтропий, теплоемкостей, энтальпий и электродных потенциалов породообразующих минералов окисного состава вычисляется сумма составляющих минералы окислов (формулы 2, 3, 4, 5, 6) с использованием таблицы коэффициентов соотношений окислов в физико-химических параметрах (таблица 2), составленной на основе справочника термодинамических величин.

Таблица 2. Соотношения окислов и физико-химических параметров.

	<i>SiO₂</i>	<i>TiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>FeO</i>	<i>MnO</i>	<i>MgO</i>	<i>CaO</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>CO₂</i>
<i>H(вес)</i>	-908,3	-933,03	-1675,7	-822	-265	-385,1	-601,5	-635,1	-414,84	-362	-1507,2	-533
<i>G(вес)</i>	-854,2	-877,65	-1582,3	-740	-244	-363,34	-569,3	-603,5	-376,1	-322	-1371,7	-484
<i>S(вес)</i>	42,68	49,92	50,9	87	60,8	61,5	27,07	38,1	75,3	96	140,3	46
<i>C(вес)</i>	44,48	56,44	79	103,7	48,12	44,83	37,41	42,8	72,43	83,6	102	38,6
<i>E(вес)</i>	-0,028	-0,020	-0,033	-0,005	-0,006	-0,017	-0,059	-0,051	-0,088	-0,062	-0,001	0,011
<i>mol</i>	0,017	0,013	0,010	0,006	0,014	0,014	0,025	0,018	0,016	0,011	0,007	0,023
<i>H(M)</i>	-15,118	-11,682	-16,435	-5,147	-3,689	-5,429	-14,926	-11,325	-6,693	-3,843	-10,614	-12,111
<i>G(M)</i>	-14,218	-10,988	-15,519	-4,634	-3,396	-5,122	-14,127	-10,761	-6,068	-3,418	-9,660	-10,998
<i>S(M)</i>	0,7104	0,6250	0,4992	0,5448	0,8463	0,8669	0,6717	0,6794	1,2149	1,0191	0,9880	1,0452
<i>C(M)</i>	0,7403	0,7066	0,7748	0,6494	0,6698	0,6319	0,9283	0,7632	1,1686	0,8875	0,7183	0,8771
<i>E(M)</i>	-0,0471	-0,0256	-0,0320	-0,0033	-0,0085	-0,0235	-0,1455	-0,0911	-0,1413	-0,0659	-0,0010	0,0245

где *H(вес)* и *H(M)* Энтальпия: (вес) - доля веса в породах, (M) - в молях;

G(вес) и *G(M)* Энергия Гиббса: - (вес) - доля веса в породах, (M) - в молях;

S(вес) и *S(M)* Энтропия: (вес) - доля веса в породах, (M) - в молях;

C(вес) и *C(M)* Теплоемкость: (вес) - доля веса в породах, (M) - в молях;

E(вес) и *E(M)* Электродный потенциал: (вес) - доля веса в породах, (M) - в молях;

mol - 100 грамм пород в Молях.

$$S_{\Sigma i}^0 = \sum M_i * S_i^0 \quad (2)$$

$$C_{\Sigma i}^0 = \sum M_i * C_i^0 \quad (3)$$

$$H_{\Sigma i}^0 = \sum M_i * H_i^0 \quad (4)$$

$$G_{\Sigma i}^0 = \sum M_i * G_i^0 \quad (5)$$

$$E_{\Sigma i}^0 = \sum M_i * E_i^0 \quad (6)$$

Где $S_{\Sigma i}^0$, $C_{\Sigma i}^0$, $H_{\Sigma i}^0$, $G_{\Sigma i}^0$, $E_{\Sigma i}^0$ – энтропия, теплоемкость, энтальпия, энергия Гиббса и электродный потенциал минералов, вычисленные по сумме окислов.

M_i – мольная доля *i*-го окисла в минерале.

S_i^0 , C_i^0 , H_i^0 , G_i^0 , E_i^0 стандартные мольные значения энтропии, теплоемкости, энтальпии, энергии Гиббса и электродного потенциала *i*-го окисла, приведены в таблице 2.

Исходными данными для вычисления значений силикатов по соотношению «стандартных» (входящих в принятый алфавит) горных пород являются следующие характеристики пород: *sil, car, arg, ale, san, con, lip, daz, and, baz, tks, tss, tsos, gz, gzd, dio, gab, sien*.

Для расчета *sio2* используется формула

$$sio2_{\sum i}^0 = \sum M_i * sio2_i^0 \quad (7)$$

Для элементов *al2o3, na2o, k2o, cao, mgo, feo, fe2o3, tio2, co2* вычисления производятся аналогично *sio2* (формула 7), используя соотношения из таблицы 3.

Таблица 3. Соотношения пород и окислов

	<i>sil</i>	<i>car</i>	<i>arg</i>	<i>ale</i>	<i>san</i>	<i>con</i>	<i>lip</i>	<i>daz</i>	<i>and</i>	<i>baz</i>	<i>tks</i>	<i>tss</i>	<i>tsos</i>	<i>gr</i>	<i>grd</i>	<i>dio</i>	<i>gab</i>	<i>sien</i>
<i>sio2</i>	86	3	60	67	75	75	73	66	60	49	73	63	49	70	65	57	49	61
<i>al2o3</i>	4.7	1.9	16.4	12.5	8	8	14	16.5	17.5	16	14	17	16	14.5	16	17	15.5	16.5
<i>na2o</i>	0	0.1	1.5	1	0.5	0.5	3	4	3.5	3.2	3	3.8	3.2	3.5	3.7	3.4	3	4
<i>k2o</i>	0	0.5	3.8	2.7	1.5	1.5	4.5	2.7	2	1.6	4.5	2.3	1.6	4.5	2.8	2.2	1	4
<i>cao</i>	1.5	43	3.8	4.7	5.5	5.5	1.3	3.5	5.8	9	1.3	4.7	9	2	4.5	6.7	9.1	4.3
<i>mgo</i>	0.5	8	2.8	2	1.2	1.2	0.5	1.4	2.8	6.2	0.5	2.1	6.2	0.9	2	4.2	7	2.5
<i>feo</i>	0.5	0	2.8	1.8	0.8	0.8	1	1.9	3.5	6.4	1	2.7	6.4	1.8	2.7	4.4	8.5	3.3
<i>fe2o3</i>	6.2	0.5	4.5	3.3	2	2	1.5	2.4	3.5	5.4	1.5	2.9	5.4	1.6	1.7	3.2	3.5	2.8
<i>tio2</i>	0	0	1	0.8	0.5	0.5	0.3	0.6	0.8	1.4	0.3	0.7	1.4	0.4	0.6	0.8	1.4	1
<i>co2</i>	0.6	43	3.4	4.2	5	5	0.9	1.0	0.6	1.8	0.9	0.8	1.8	0.8	1	1.1	2	0.6

Программа Entop разработана для вычисления физико-химических характеристик. Вид главной формы программы показан на рисунке 1. При загрузке исходных данных программа проверяет номер строки и столбца, вызвавшей ошибку, и выводит их в информационном сообщении.

Таблица 4. Фрагмент данных исходного файла, содержащий нечисловое значение.

19					
Xm	Ym	Z	npp	Ng	Eg
307471.62	503635.91	1	2	49.633889	66.334722
300469.65	515333.59	1	4	49.736667	66.231944
369936.65	334267.95	1	5	48.128333	67.252778
327764.37	494976.2	1	6	49.562222	66.619167
322021.2	497727.7	1	7	49.585278	66.538611
331151.34	447346.92	1	SYMB	49.135278	66.686111
338608.7	471238.94	1	9	49.351944	66.778611

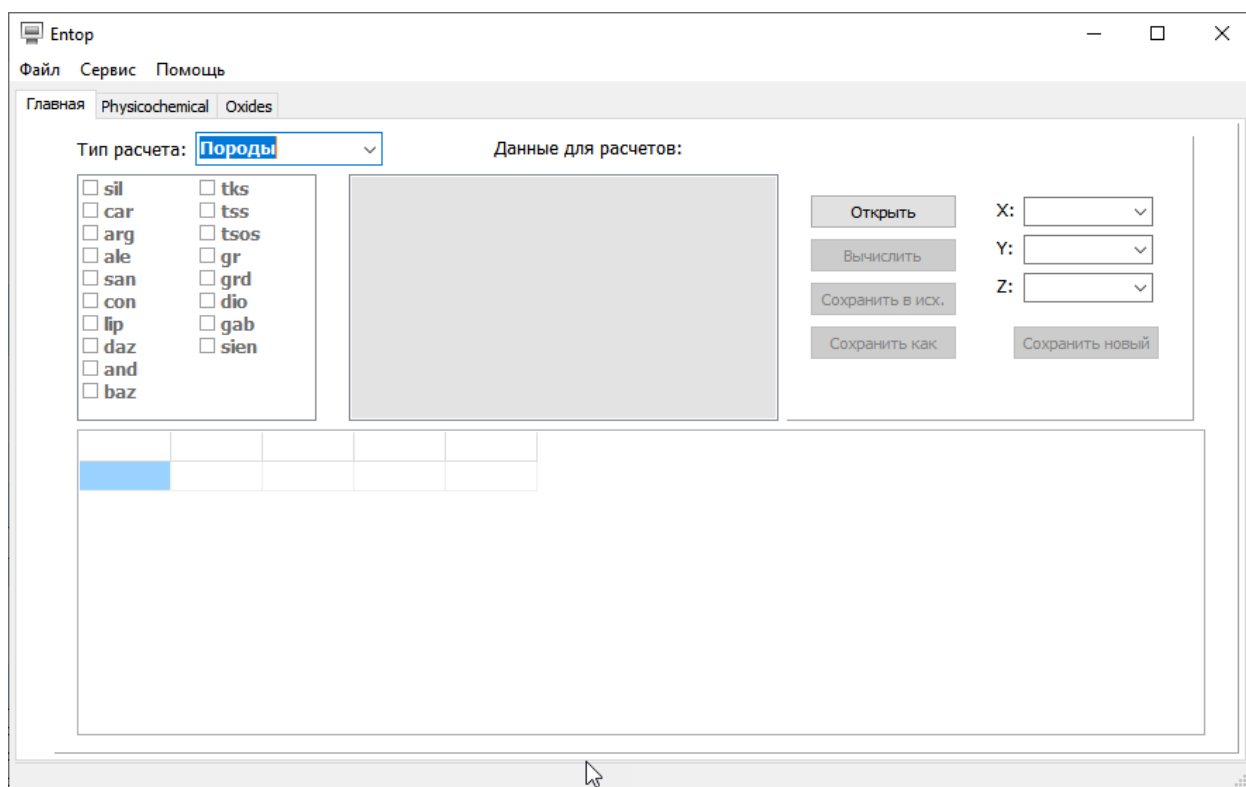


Рисунок 1. Вид главной формы программы Entop, тип расчета «Породы».

Во время загрузки тестовых исходных данных из таблицы 4 с заведомо известным нечисловым значением «SYMB» в строке № 6 столбце № 4, сгенерировалось соответствующее сообщение на рисунке 2. Если ошибку вызывает строковое значение, там, где ожидалось числовое, программа игнорирует эту ошибку, и загружает строку, но признак, который содержит строку нельзя будет использовать в вычислениях.

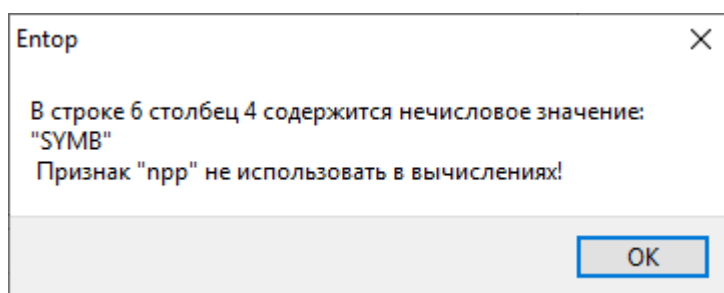


Рисунок 2. Информационное сообщение с номером строки и столбца данных, вызвавших ошибку.

Вычисление силикатов на основе данных пород и таблицы коэффициентов окислов проводится следующим образом, на главной форме программы из выпадающего списка «Тип расчета» выбирается пункт «Породы» (см. рисунок 1). В правой области формы будут расположены кнопки управления, которые

дублируются в главном меню программы, и выпадающие списки для указания координатных осей. Для загрузки файла пород нажимаем кнопку "Открыть", в диалоговом окне выбираем файл данных.

Программа проверяет при загрузке файл на пригодность для вычислений. Если файл содержит необходимый набор характеристик, выйдет окно с сообщением «Файл загружен» (рисунок 3).

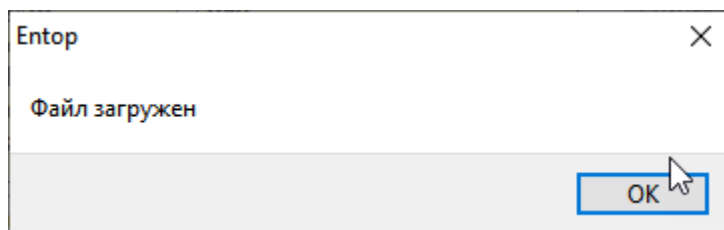


Рисунок 3. Всплывающее окно после успешной загрузки файла.

Если исходный файл не содержит необходимый набор характеристик, отобразится окно с сообщением «Набор параметров файла не подходит для расчетов» (рисунок 4).

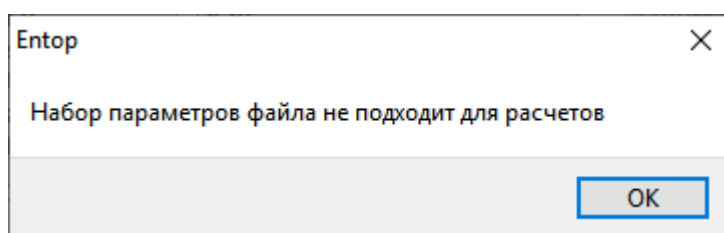


Рисунок 4. Всплывающее окно после загрузки некорректного файла.

Для вычисления энтропии на основании данных силикатов нажимаем кнопку "Вычисление". Результаты вычисления силикатов дописываются в исходный файл нажатием кнопки "Дописать в файл", вычисленные данные энтропии допишутся к исходным данным добавленными столбцами *sio2*, *tio2*, *al2o3*, *feo*, *fe2o3*, *mgo*, *cao*, *na2o*, *k2o*, *co2* (см. таблицу 5).

Таблица 5. Фрагмент сохраняемого файла с результатами расчета окислов.

39															
<i>n</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	...	<i>gab</i>	<i>sien</i>	<i>sio2</i>	<i>al2o3</i>	<i>na2o</i>	<i>k2o</i>	<i>cao</i>	<i>mgo</i>	<i>feo</i>	<i>fe2o3</i>	<i>tio2</i>	<i>co2</i>
1	4,60	2,30	...	8,05	2,30	54,01	11,46	2,21	2,04	5,79	2,91	3,05	2,81	0,73	6,93
2	5,20	3,33	...	7,78	11,11	61,82	12,86	2,56	2,37	5,84	2,59	2,78	2,57	0,85	2,10
3	9,43	4,72	...	8,49	6,60	52,30	12,22	2,49	2,25	6,56	2,96	3,02	3,22	0,78	5,54
...

Чтобы сгенерировать новый файл, указываем наименования столбцов координатных осей в правой части формы программы в выпадающих списках X, Y, Z и нажимаем кнопку "Создать файл". Сформируется файл с следующим набором столбцов: *x, y, z, sil, car, arg, ale, san, con, lip, daz, and, baz, tks, tss, tsos, gz, gzd, dio, gab, sien, sio2, tio2, al2o3, feo, fe2o3, mgo, cao, na2o, k2o, co2*. Список столбцов включает в себя координаты, породы и силикаты.

Для того, чтобы в программе Entor вычислить энтропию по данным силикатных анализов и таблицы физико-химических анализов, на главной форме выбираем из выпадающего списка тип расчета "Силикаты (М)" (см. рисунок 5). В правой области формы в секции "Вычисление кросс-энтропии:" будут расположены кнопки управления и выпадающие списки для указания координатных осей. Для загрузки файла силикатов нажимаем кнопку "Открыть", в диалоговом окне выберем файл данных, который обязательно должен содержать данные силикатов *sio2, tio2, al2o3, feo, fe2o3, mgo, cao, na2o, k2o, mno, p2o5*. Для вычисления энтропии на основании данных силикатов нажимаем кнопку "Вычислить.". Результаты вычисления энтропии можно дописать в исходный файл нажатием кнопки "Дописать в файл", вычисленные данные энтропии допишутся к исходным данным дополнительными столбцами *H, G, S, C, E, Mol, H_M, G_M, S_M, C_M, E_M*.

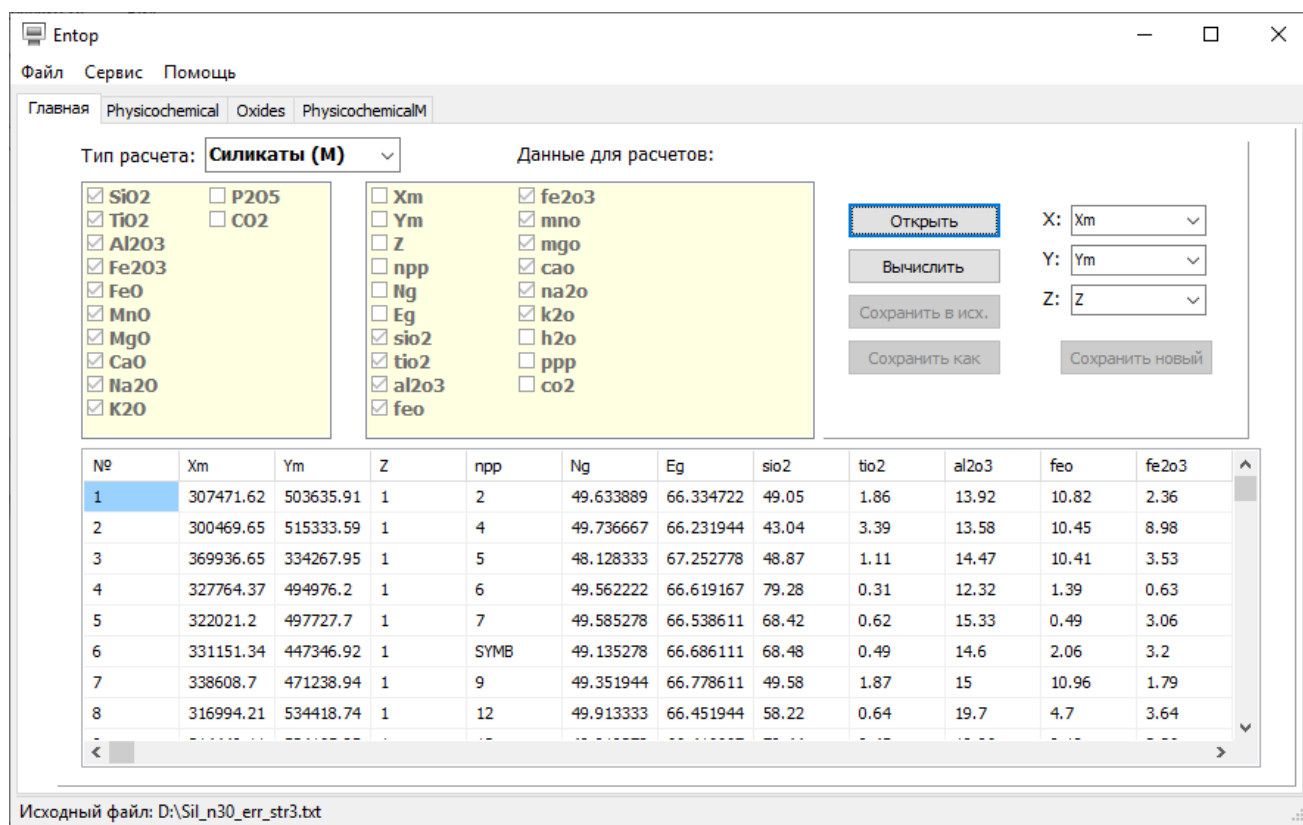


Рисунок 5. Вид главной формы программы Entor, тип расчета «Силикаты (М)».

Чтобы сгенерировать новый файл, нужно указать наименования столбцов координатных осей в выпадающих списках X, Y, Z под надписью "Выбор

координат" и нажать кнопку "Создать файл". Сформируется файл со следующим набором столбцов: x , y , z , sio_2 , tio_2 , al_2o_3 , feo , fe_2o_3 , mgo , cao , na_2o , k_2o , co_2 , H , G , S , C , E , Mol , H_M , G_M , S_M , C_M , E_M . Набор столбцов включает в себя пространственные координаты, содержание силикатов и рассчитанные физико-химические параметры геологической среды.

Литература к разделу 3.

1. Лукманов М.А. Моделирование физико-химических характеристик геологического пространства для целей прогнозирования рудных полезных ископаемых. Алма-Ата, 1989, 30с.

4. Модернизация программы Modeling (ПК Elan), предназначенной для построения аппроксимационных моделей 1-3D физических и виртуальных характеристик геологического пространства.

Проведена глубокая модернизация программы построения аппроксимационных моделей 1-3D физических и виртуальных полей [1] (программа Modeling ПК Elan). В процессе модернизации разработаны две модификации программы, выполняющие разные функции: Modeling3 и ModelingA.

В Modeling3 реализованы два функционала:

1) учёт «веса» каждой точки исходных данных, используемых для построения моделей;

2) учёт наличия «квантования» моделируемых характеристик с возможностью придания каждому уровню различных параметров моделирования.

В программе ModelingA разработан функционал для учёта локальной анизотропии строящихся полей;

В программах используются новые интерфейсные формы. Сгруппированы и расположены в логическом порядке элементы ввода параметров. Автоматизировано заполнение элементов ввода задающих диапазоны пространственных интервалов.

Для получения исследуемых данных принят общий формат файлов. Текстовый файл состоит из трёх уровней: количество столбцов, название столбцов и сами данные. Пример (учебный):

```

5
x      y      z      sio2      mgo
12.5      -23      2.9      5.232 1.2323
-1.54      -3      2.8      0.2      81.3
42.45      0.37      2.2      7.39      7.23
2.05      2.3      2.1      0.322 9.997
.....

```

В первой строке записано количество столбцов, во второй наименования столбцов, отделённые друг от друга символами табуляции или пробелами, в третьей строке и в последующих расположены сами данные в соответствии с наименованиями столбцов отделённые друг от друга символами табуляции или пробелами.

4.1 Программа Modeling3.

В программе Modeling3 реализованы: учёт «веса» каждой точки исходных данных, используемых для построения моделей и учёт наличия «квантования» моделируемых характеристик с возможностью придания каждому уровню различных параметров моделирования.

Главное меню программы «Modeling3» имеет стандартный вид с дублированием основных функций на панели инструментов (главное меню и панель инструментов пользователь может настроить по своему усмотрению) см. рисунок 1.

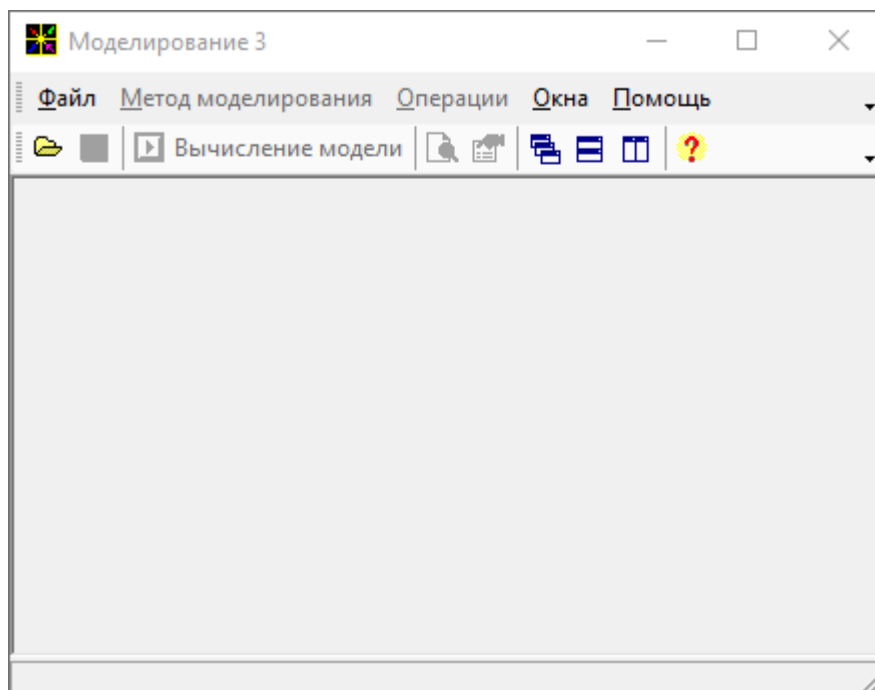


Рисунок 1. Общий вид главного окна программы «Modeling3»

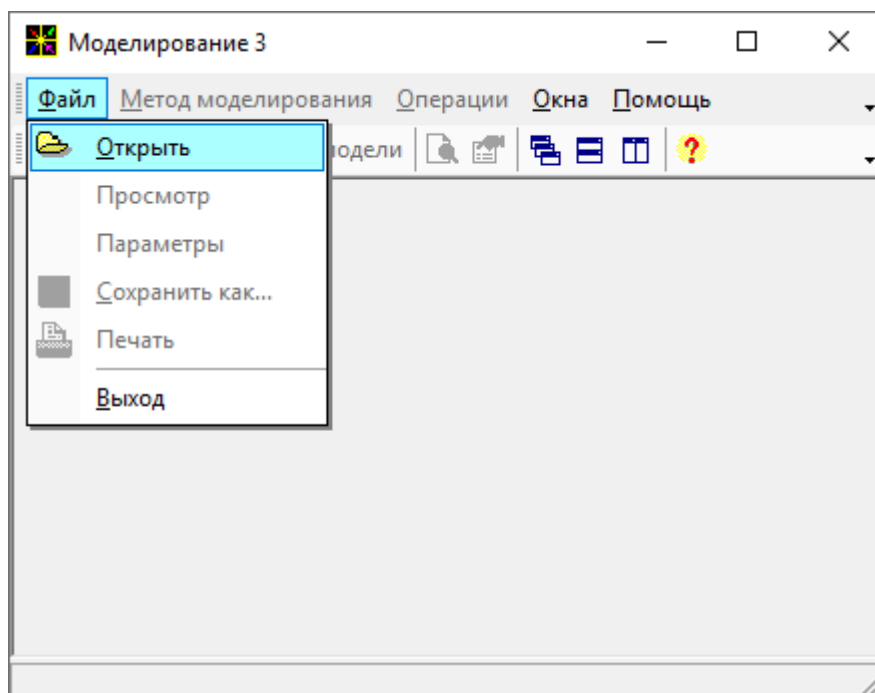


Рисунок 2. Вид подменю главного меню «Файл».

Подменю состоит из следующих пунктов:

Открыть. Назначение пункта открытия файла данных, над которыми будут производиться анализ. После выбора данного пункта откроется стандартное диалоговое окно выбора файлов см. рисунок3.

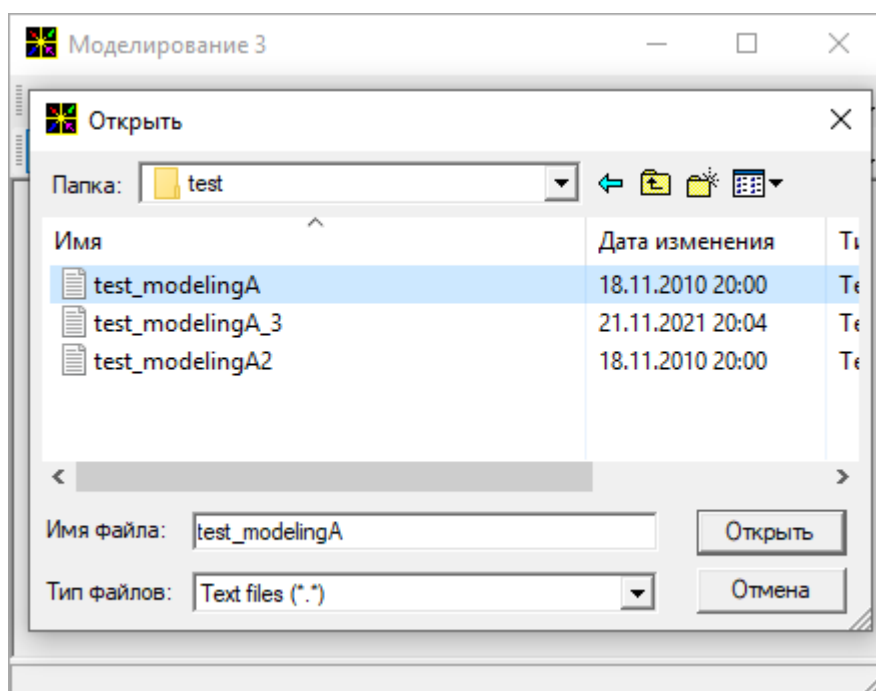


Рисунок 3. Вид стандартного диалогового окна выбора файла.

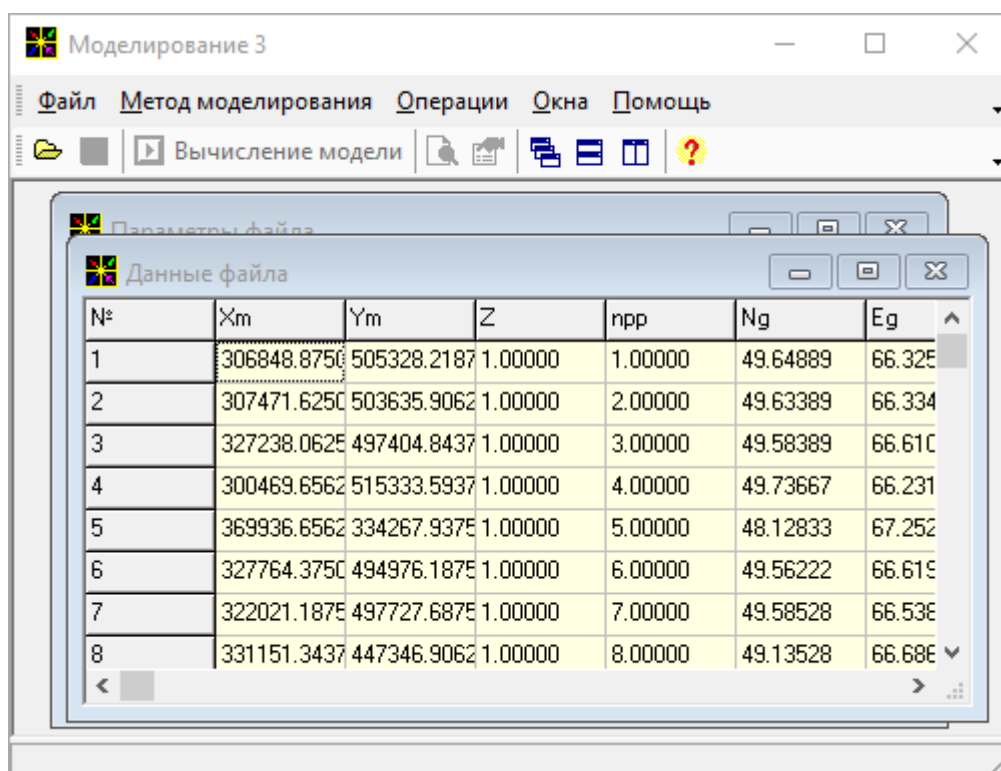


Рисунок 4. Вид окна Данные файла.

Просмотр. Пункт меню становится активным после открытия файла данных (до открытия файла выбрать этот пункт меню невозможно). После выбора пункта в главном окне программы «Modeling3» откроется окно с данными файла см. рисунок 4.

Параметры. Назначение пункта меню отобразить пользователю основные параметры файла данных см. рисунок 5.

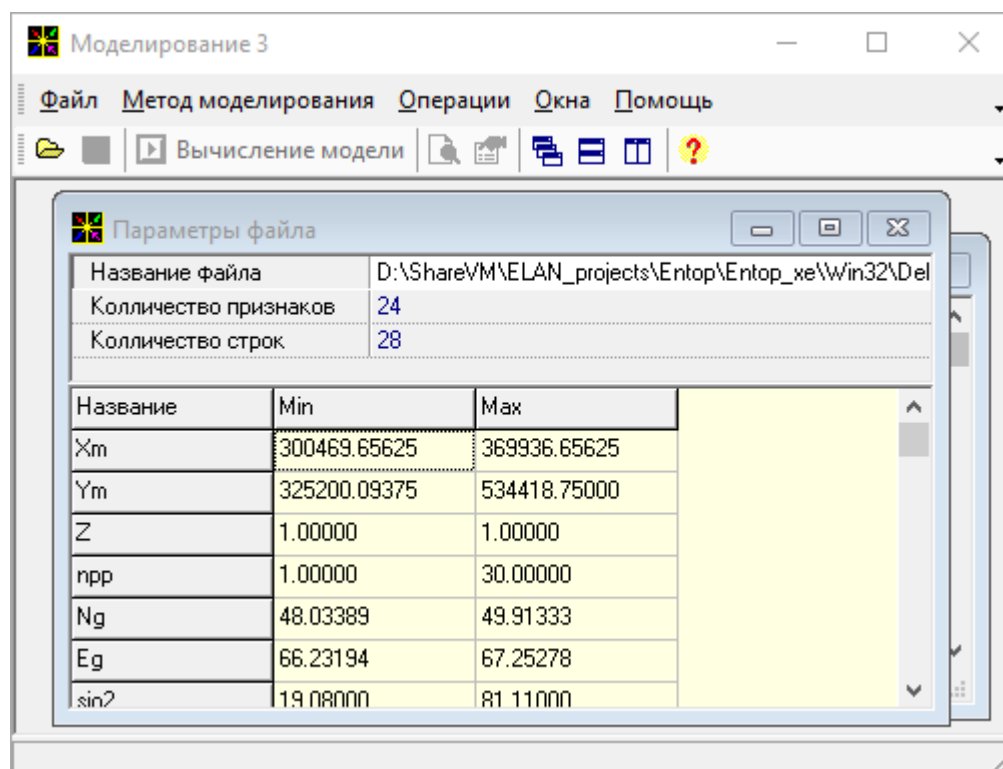


Рисунок 5. Вид окна Параметры файла.

Сохранить как... Пункт меню предназначен для сохранения данных, которые были получены в результате обработки, не активен до вычисления.

Выход. Пункт предназначен для завершения работы подсистемы. Внимание! В случае выхода данные результата обработки не будут сохранены.

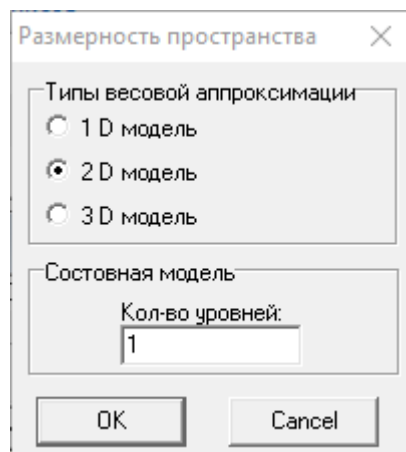


Рисунок 6. Диалоговое окно Тип весовой аппроксимации.

Подменю пункта главного меню «Метод моделирования»:

Весовая аппроксимация. Пункт предназначен для запуска процесса вычисления весовой аппроксимации. После выбора пункта открывается диалоговое окно «Тип весовой аппроксимации», в котором нужно выбрать необходимый тип аппроксимации см. рисунок 6.

В окне Тип весовой аппроксимации выбираем 2D модель, откроется диалоговое окно Тип плоскости см. рисунок 7.

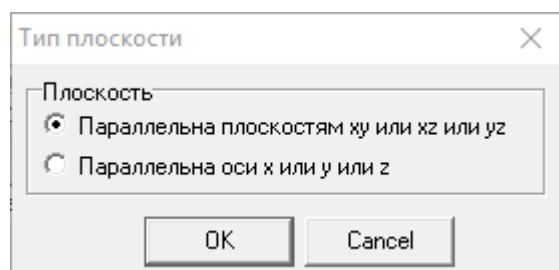


Рисунок 7. Тип плоскости.

В диалоговом окне «Тип плоскости» необходимо выбрать необходимый пункт, после чего нужно нажать кнопку «Ок», чтобы продолжить. В результате нажатия откроется окно «Параметры» см. рисунок 8. Элементы ввода расположены на форме в логическом порядке. Выделяются вертикально взаиморасположением подгруппы по осям координат: «Ось Х», «Ось Y» и «Ось Z». По горизонтали располагаются подгруппы: выбор оси, «границы учета данных», «границы моделирования», «шаги сетки», «Аппроксимация на исходные данные» и «Параметры весовой функции».

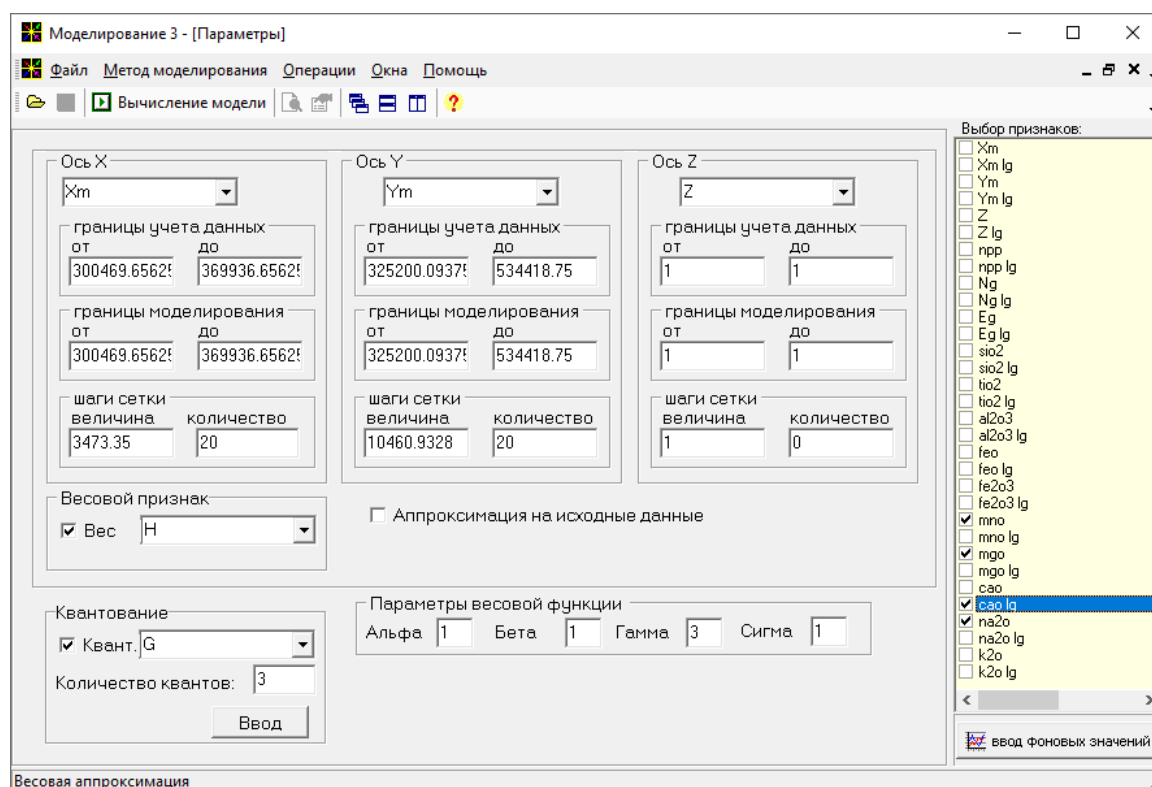


Рисунок 8. Форма ввода параметров программы Modeling3.

Где возможно, на полях ввода автоматизировано автозаполнение, это четыре первые горизонтальные подгруппы.

При первичной загрузке формы ввода параметров в соответствующие поля выбора оси X, Y и Z автоматически подставляются наименования столбцов данных «x» или «X», «y» или «Y» и «z» или «Z», условием автозаполнения является наличие одноименных с наименованием оси колонок данных.

Далее, при автоматическом или ручном выборе каждой оси X, Y или Z, программа заполняет для соответствующей оси поля «границы учета данных»: в поле «от» - минимальное значение по соответствующей оси; в поле «до» - максимальное значение.

Следующими, заполняются в авторежиме поля «границы моделирования»: в поле «от» - минимальное значение по соответствующей оси; в поле «до» - максимальное значение.

В группе «шаги сетки» поля «величина» и «количество» пересчитываются и заполняются в авторежиме при изменении диапазона границы моделирования и при взаимном изменении, что очень удобно.

Функционал учёта «веса» каждой точки исходных данных, используемых для построения моделей активируется и настраивается в группе ввода «Весовой признак». Для активации отмечаем галочкой чек-бокс «Вес», и выбираем из выпадающего списка признак веса. Признак веса содержит весовые коэффициенты в диапазоне от 0 до 1. Каждой точке в процессе вычисления методом весовой аппроксимации в предыдущей версии программы Modeling присваивался аппроксимационный вес, величина которого зависела от пространственного взаиморасположения исходных точек. В модернизированной версии этот вес дополнительно перемножается на коэффициент, который указан для каждой точки в «весовом признаке». Таким образом можно влиять на построение модели, применяя информацию о степени достоверности анализов в каждой пробе.

Опция «Аппроксимация на исходные данные» и поля ввода из группы «Параметры весовой функции», по аналогии со старой формой ввода, заполняются из сохраненной конфигурации предыдущего вычисления модели.

Функционал учёта наличия «квантования» моделируемых характеристик с возможностью придания каждому уровню различных параметров моделирования включается и настраивается в группе ввода «Квантование». Чтобы использовать квантование, отмечаем галочкой чек-бокс «Квант», и выбираем из выпадающего списка признак квантования. Признак квантования в исходном файле содержит номера квантов (групп) от 1 до 10. Указываем количество квантов от 1 до 10. Для ввода параметров весовой функции индивидуально для всех уровней, нажимаем на кнопку «Ввод», и форма переключится для ввода параметров квантов (рисунок 9).

Для каждого кванта задаются свои характеристики весового моделирования. После заполнения параметров весовой функции всех квантов нажимаем на кнопку «скрыть» в правом нижнем углу и возвращаемся на предыдущий вид формы ввода параметров (рисунок 8).

Квантование

Квант №1	Альфа: 2	Бета: 1	Гамма: 1	Сигма: 1
Квант №2	Альфа: 2	Бета: 1	Гамма: 1	Сигма: 1
Квант №3	Альфа: 2	Бета: 1	Гамма: 1	Сигма: 1

Квантование

☒ Квант: G

Количество квантов: 3

Ввод

Скрыть

Рисунок 9. Форма ввода параметров квантования.

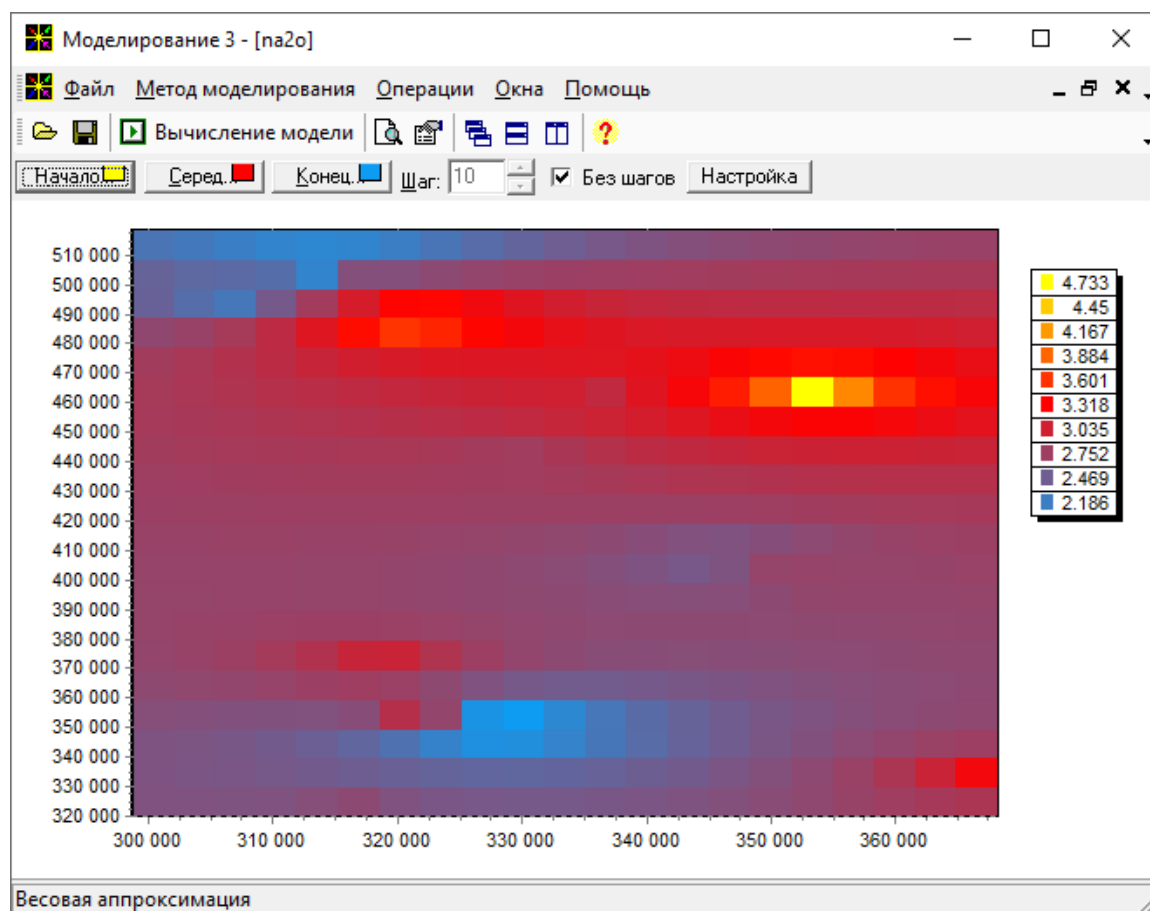


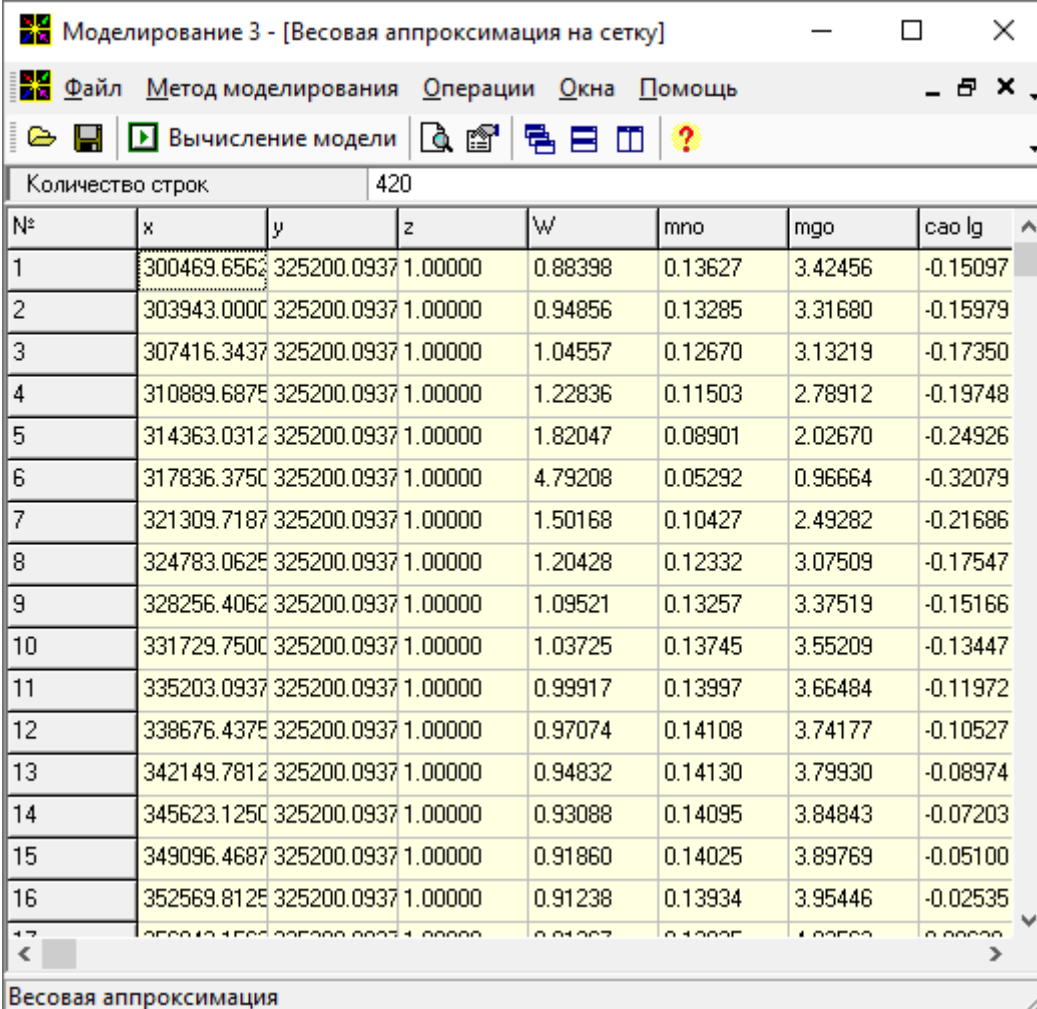
Рисунок 10. Вид окна визуализации с графиком 2D.

При вычислении аппроксимационной модели каждый квант строится по своим параметрам, далее в каждой модельной точке результаты вычисления всех квантов накладываются друг на друга с учетом аппроксимационного веса в них, и вычисляется результирующее значение в модельной точке.

Подменю пункта главного меню «Операции»:

Вычисление. Пункт выполняет запуск процесса вычисления, активен только после выбора метода моделирования.

Визуализация. Пункт открывает окна с графиками 2D размерности см. рисунок 10



N°	x	y	z	W	mno	mgo	cao lg
1	300469.6563	325200.0937	1.00000	0.88398	0.13627	3.42456	-0.15097
2	303943.0000	325200.0937	1.00000	0.94856	0.13285	3.31680	-0.15979
3	307416.3437	325200.0937	1.00000	1.04557	0.12670	3.13219	-0.17350
4	310889.6875	325200.0937	1.00000	1.22836	0.11503	2.78912	-0.19748
5	314363.0312	325200.0937	1.00000	1.82047	0.08901	2.02670	-0.24926
6	317836.3750	325200.0937	1.00000	4.79208	0.05292	0.96664	-0.32079
7	321309.7187	325200.0937	1.00000	1.50168	0.10427	2.49282	-0.21686
8	324783.0625	325200.0937	1.00000	1.20428	0.12332	3.07509	-0.17547
9	328256.4062	325200.0937	1.00000	1.09521	0.13257	3.37519	-0.15166
10	331729.7500	325200.0937	1.00000	1.03725	0.13745	3.55209	-0.13447
11	335203.0937	325200.0937	1.00000	0.99917	0.13997	3.66484	-0.11972
12	338676.4375	325200.0937	1.00000	0.97074	0.14108	3.74177	-0.10527
13	342149.7812	325200.0937	1.00000	0.94832	0.14130	3.79930	-0.08974
14	345623.1250	325200.0937	1.00000	0.93088	0.14095	3.84843	-0.07203
15	349096.4687	325200.0937	1.00000	0.91860	0.14025	3.89769	-0.05100
16	352569.8125	325200.0937	1.00000	0.91238	0.13934	3.95446	-0.02535
17	356043.1562	325200.0937	1.00000	0.91007	0.13895	4.00500	-0.00000

Рисунок 11. Вид окна Весовая аппроксимация (Отчёт).

Просмотр. Пункт открывает окно Отчёт с результатом вычислений (см. рисунок 11).

4.2 Описание программы ModelingA.

Программа ModelingA предназначена для построения регулярных блочных

аппроксимированных 2D-моделей с учетом неоднородной изменчивости изучаемой среды. В программе используются алгоритмы весовой аппроксимации с учетом величины и направления локальной анизотропии в каждой исходной точке данных. Параметры моделирования позволяют гибко управлять видом модели. Программа может применяться для построения моделей рудных месторождений, отдельных рудных массивов, а также моделей любых распределённых в пространстве характеристик независимо от их физической природы.

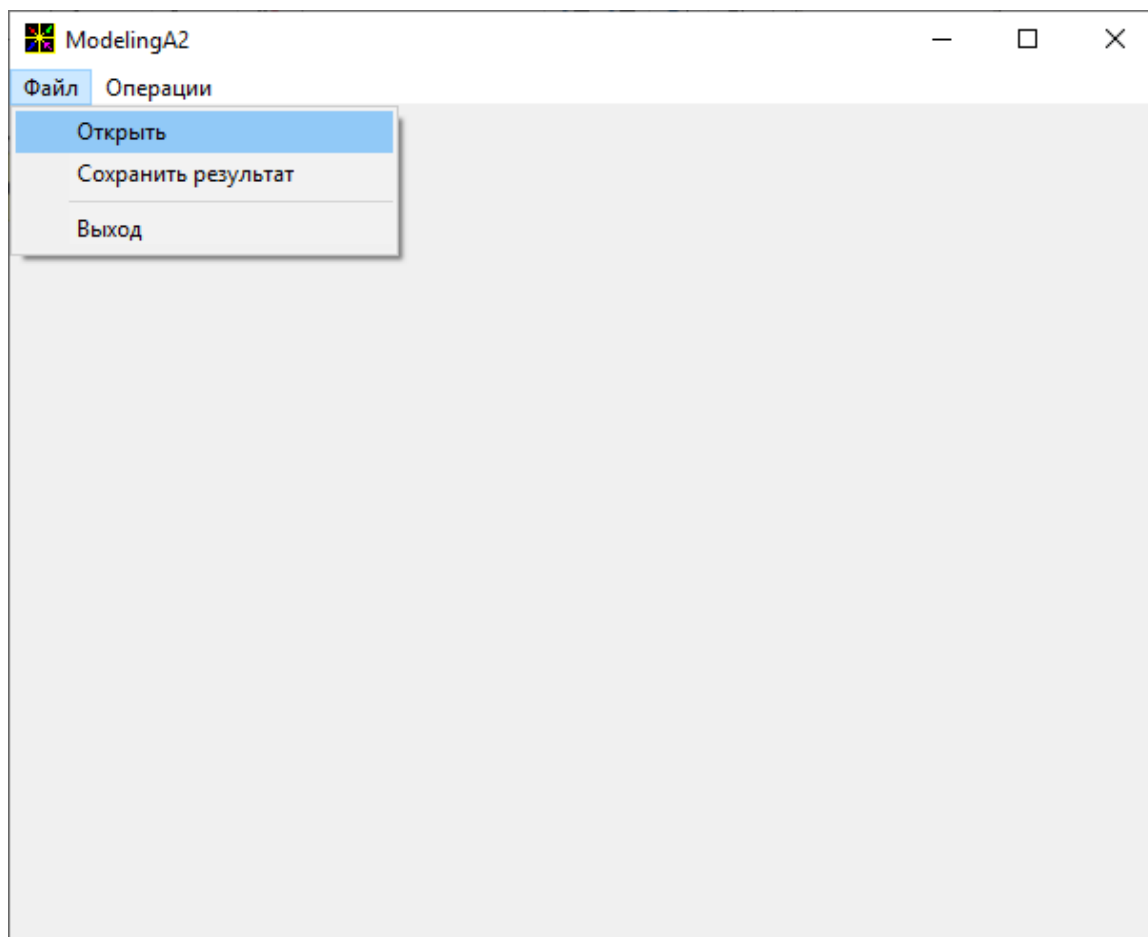


Рисунок 12. Вид программы ModelingA после запуска. Меню «Файл».

При запуске программы ModelingA появится пустая форма программы, на которой отсутствуют окна для заполнения параметров и график. Окна для задания параметров появятся после открытия файла данных, а график – после окончания вычислений.

Для открытия файла исходных данных заходим в меню «Файл», подменю «Открыть» (рисунок 12), щелкаем левой кнопкой мыши, и в появившемся стандартном диалоговом окне выбираем файл, нажимаем «ОК». Появятся списки параметров (рисунок 13).

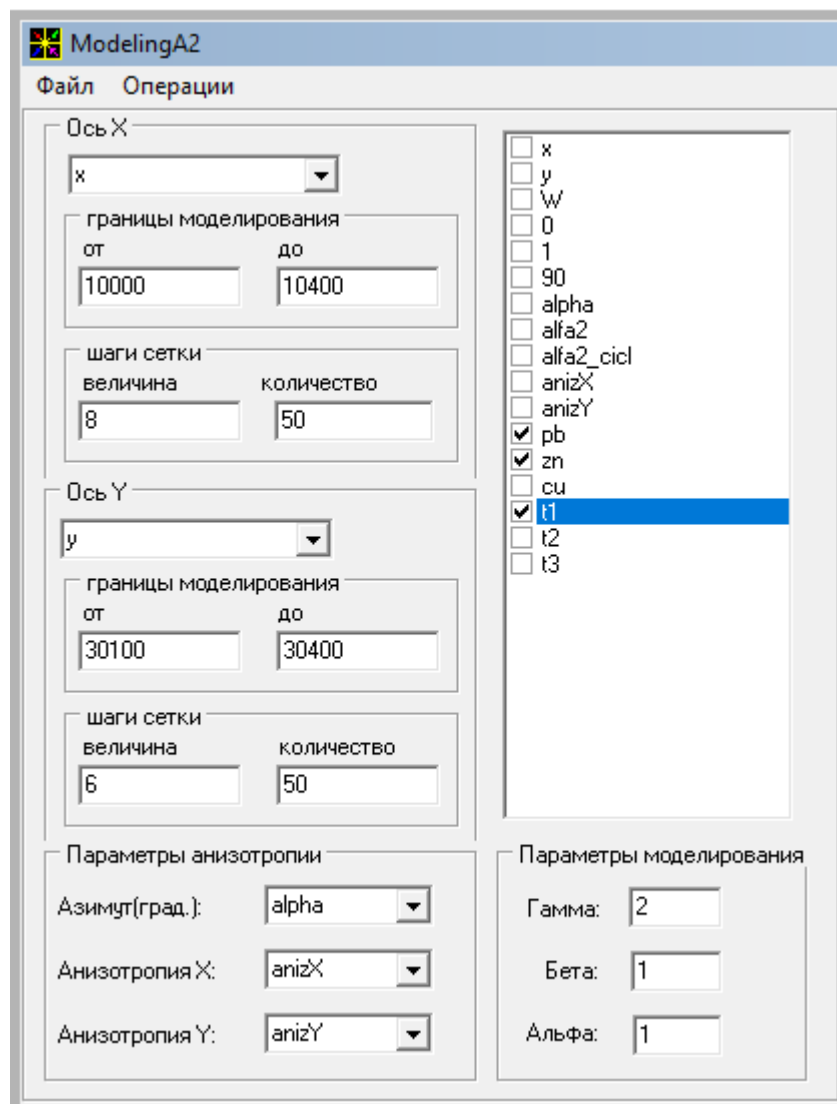


Рисунок 13. Окно параметров моделирования.

В появившемся слева списке для осей X и Y вводим следующие параметры:

- наименование признака данных, содержащего координаты точек;
- границы моделирования «от», «до»;
- величина шагов сетки;
- количество шагов сетки.

Параметры анизотропии:

- Азимут (град) – наименование признака данных, содержащего направление минимальной изменчивости в градусах начиная от 12 часов по часовой стрелке;
- АнизотропияX - наименование признака данных, содержащего значения анизотропии вдоль направления заданного азимутом угла;
- АнизотропияY - наименование признака данных, содержащего значения анизотропии перпендикулярно направлению заданного азимутом угла;

Параметры моделирования, управляющие свойствами аппроксимационной модели (подробное описание приводится в конце описания программы):

- «Гамма»;

- «Бета»;
- «Альфа».

В середине окна программы находится список параметров, галочка ставится напротив тех, которые надо вычислить.

После заполнения и выбора параметров для запуска вычисления модели нажимаем кнопку «Вычислить», расположенную снизу справа под списком параметров или в меню «операции» подменю «Вычислить».

Когда модель будет построена, программа выведет сообщение «вычисления завершены», нажимаем «ОК» и смотрим на визуализацию модели (рисунок 14). С помощью выпадающего списка над графиком можно выбирать последующие признаки для визуализации.

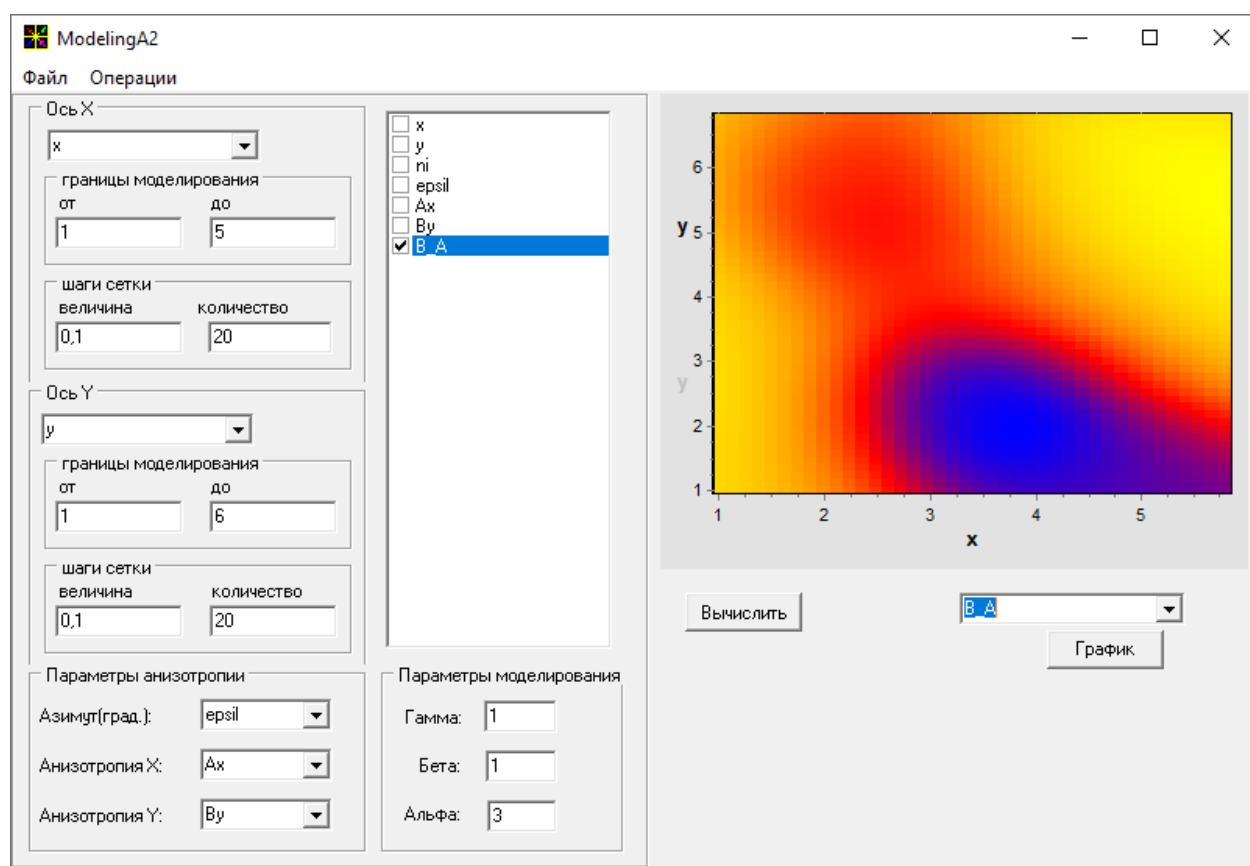


Рисунок 14. Общий вид программы ModelingA с визуализацией модели.

Чтобы сохранить результаты вычисления, выбираем меню «Файл» подменю «Сохранить результат», данные сохраняются в текстовом формате.

На рисунке 15 показан результат моделирования величины B/A с учетом анизотропии пространства (задается углом ϵ и коэффициентами A , B).

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ АППРОКСИМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ (ПРОГРАММА *Modeling*)

$$w(x,i) = 1 / [1 + \beta(R(x,i)/\gamma)^\alpha]$$

1) Параметр γ (масштабный множитель) выбираем таким образом, чтобы:

- величина R/γ была в пределах от 30 до 60;
- или величина γ равнялась радиусу влияния точек наблюдения R_e (определяется по вариограммам);
- или величина γ равнялась среднему расстоянию между точками наблюдения (при относительно равномерном их распределении);
- или величина γ равнялась длине, соответствующей 1 см карты

2) Параметр α рационально принять равным 3 (величину 2 - можно принять для плавноизменяющихся величин; 4 - для очень изменчивых)

3) Параметр β выбирать исходя из представлений о радиусе зон влияния точек наблюдения. Если $\gamma = R_e$, то при $\beta = 1$ получим нормальную модель; $\beta = 10$ - «детальную» и при $\beta = 0.1$ - «генерализованную»

4) Желательно, чтобы характеристики $\sum w(x,i)$ в области моделирования изменялись не слишком резко ($\max \sum w / \min \sum w < 10-50$)

5) Картина распределения моделируемого признака должна быть структурирована, но не создавать отдельные экстремумы в точках наблюдения.

Пример:

7

x	y	ni	epsil	Ax	By	B/A
1.5	1	1	170	0.5	1	2
4	1	2	90	0.7	1	1.4
3	2	3	90	1	1	1
1	3	4	165	0.5	1	2
5	3	5	110	0.5	1	2
2	5	6	170	0.7	1	1.4
4	5	7	120	0.5	1	2
1	6	8	30	0.5	1	2

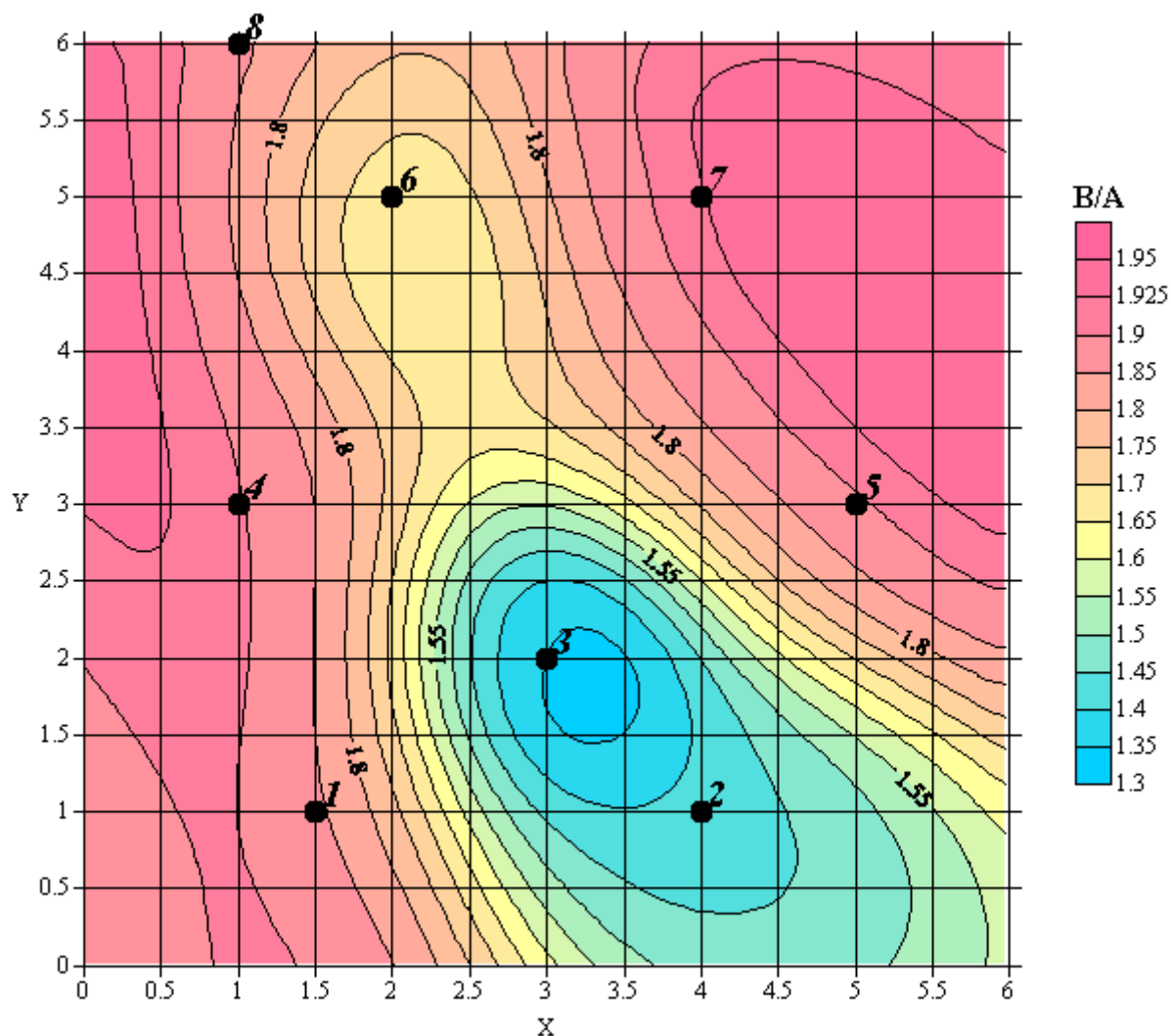


Рисунок 15. Результат моделирования величины B/A с учетом анизотропии пространства (задается углом ϵ и коэффициентами A, B).

Литература к разделу 4.

1. Лось В.Л., Усманов Ф.А., Гольдберг И.С. и др. Прогноз, поиски и моделирование рудных объектов // Комплексная переработка минерального сырья Казахстана. Том 1а. Алматы, 2008, 466с.

5. Модернизация процедуры моделирования методом «скользящее окно» (программа Runwind, ПК Elan) с приданием ей функции вычисления корреляции между характеристиками геологической среды.

5.1 Метод расчета ранговой (порядковой) корреляции r_n .

Ранговая корреляция является полуколичественным анализом. Применение не ограничено каким-либо законом распределения.

Допустим, что объекты генеральной совокупности обладают двумя качественными признаками. Под качественным подразумевается признак, который невозможно измерить точно, но он позволяет сравнивать объекты между собой и, следовательно, расположить их в порядке убывания или возрастания качества. Пусть выборка объема n содержит независимые объекты, которые обладают двумя качественными признаками A и B для оценки степени связи признаков вводят коэффициент ранговой корреляции Спирмена [1].

Если упорядочить, или ранжировать, объекты анализа по степени выраженности измеряемых признаков. При этом каждому объекту присваивается определенный номер, называемый рангом. Например, объекту с наименьшим проявлением признака присваивается ранг 1 и так далее. Если объекты ранжированы по двум признакам, то имеется возможность оценить тесноту связи между признаками, основываясь на рангах, т.е. тесноту ранговой корреляции [2].

$$r_n = 1 - \frac{6 * \sum (\Delta^2)}{n * (n^2 - 1)};$$

Где $\sum (\Delta^2)$ - сумма квадратов разности порядковых номеров.

n - количество проб, участвующих в подсчете.

Если имеет место повторение содержаний,

$$\text{то } r_n = 1 - \frac{6 * \left[\sum (\Delta^2) + T_x + T_y \right]}{n * (n^2 - 1)},$$

где T_x и T_y - соответствующие поправки на повторяющиеся содержания каждого из элементов.

$$T_x = \sum_1^i \frac{t_i^3 - t_i}{12}, \text{ где } i - \text{количество повторений; } t_i - \text{количество проб в } i\text{-том}$$

повторении.

Пример вычисления ранговой корреляции.

№	содерж. Рb%	пред в. порядк. №	исправ. порядк. №	содерж. Zn%	пред в. порядк. №	исправ. порядк. №	разность порядк. №№ (Δ)	(Δ2)
1	0.02	4	3	0.07	8	8.5	-5.5	30.25
2	0.07	9	9	0.07	9	8.5	0.5	0.25
3	0.03	5	6.5	0.3	11	11	-4.5	20.25
4	1	12	12	1	12	12	0	0
5	0.03	6	6.5	0.03	7	6.5	0	0
6	0.02	3	3	0.01	3	2.5	0.5	0.25
7	0.1	10	10.5	0.015	4	4	6.5	42.25
8	0.02	2	3	0	1	1	2	4
9	0.03	7	6.5	0.02	5	5	1.5	2.25
10	0.03	8	6.5	0.03	6	6.5	0	0
11	0.1	11	10.5	0.1	10	10	0.5	0.25
12	0.01	1	1	0.01	2	2.5	-1.5	2.25
								Σ(Δ2)=102

Для повторения трех содержаний ($i=3$): 0.02 (в трех пробах – $t=3$), 0.03 ($t=4$), 0.1 ($t=2$).

$$T_x = \frac{(3^3 - 3) + (4^3 - 4) + (2^3 - 2)}{12} = \frac{90}{12} = 7.5,$$

Для цинка

$$T_y = \frac{(2^3 - 2) + (2^3 - 2) + (2^3 - 2)}{12} = \frac{18}{12} = 1.5,$$

Конечный результат будет

$$r_n = 1 - \frac{6 * (102 + 7.5 + 1.5)}{12 * 143} = 1 - 0.39 = 0.612.$$

5.2 Описание программы RunWind_R.

Программа RunWind_R предназначена для разбиения 2D или 3D области на блоки заданных размеров, называемых «окнами». Внутри каждого «окна» вычисляется ранговая корреляция между парами выбранных признаков.

После запуска программы необходимо открыть файл данных при помощи вызова из меню «Файл» подменю «Открыть» (рисунок 1.), в появившемся стандартном диалоговом окне выбрать файл исходных данных.

Формат файлов должен соответствовать стандарту, принятому в программном комплексе ELAN: первая строка – количество признаков в файле; вторая строка – наименования признаков; третья и последующие строки – данные.

```

2
x      y
3      7
2      9
.....

```

Исходные данные

n	X	Y	Z	t1
1	1	1	1	1
2	2	1	1	2
3	3	1	1	3
4	4	1	1	4
5	1	2	1	1
6	2	2	1	2
7	3	2	1	3
8	4	2	1	4
9	1	3	1	1
10	2	3	1	2
11	3	3	1	3
12	4	3	1	4
13	1	4	1	1
14	2	4	1	2
15	3	4	1	3
16	4	4	1	4

Параметры

Координаты

X X

Y Y

Z Z

От

X

Y

Z

До

X

Y

Z

Размер окна

X

Y

Z

Шаги смещения

X

Y

Z

Выбор характеристик

☐ n

☐ X

☐ Y

☐ Z

☒ t1

☒ t2

☒ t3

☒ t4

☒ t5

Вычислить

Просмотр

Сохранить

Рисунок 1. Вид главной формы программы RunWind_R.

Заполняются следующие параметры:

«Координаты»: выбирается признак, содержащий пространственную координату соответственно по осям X, Y и Z;

«От»: вводится нижняя граница по координатным по осям X, Y и Z пространственного участка, на котором будет вычисляться скользящее окно;

«До»: вводится верхняя граница по координатным по осям X, Y и Z пространственного участка, на котором будет вычисляться скользящее окно;

«Размер окна» - вводится размер скользящего окна по осям X, Y и Z;

«Шаги смещения» - вводится шаг смещения при переходе на следующее окно по осям X, Y и Z.

В списке «Выбор характеристик» отмечаются признаки, которые будут участвовать в вычислении.

Заполнив параметры нажимаем кнопку «Вычислить» или через меню «Операции», «Вычислить». Запустится вычисление скользящего окна, по окончании выйдет информационное сообщение (рисунок 2)

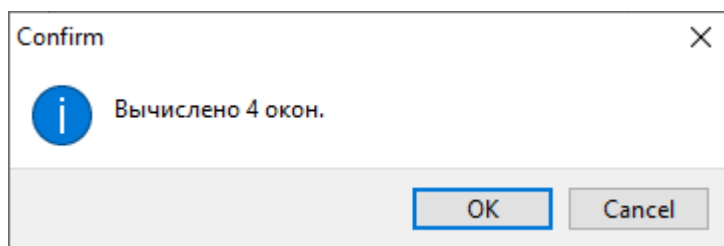


Рисунок 2. Информационное сообщение о завершении вычисления скользящего окна.

Через пункт меню «Просмотр результата» или кнопку «Просмотр» в нижней части экрана вызывается форма просмотра результатов (рисунок 3).

X	Y	Z	n	t1_t2	t1_t3	t1_t4	t1_t5	t2_t3	t2_t4	t2_t5	t3_t4	t3_t5
1	1	1	4	-0.8	0.8	0.4	0	-0.8	-0.4	0	0.4	0
1	3	1	6	-0.771	0.771	0.257	0.257	-0.771	-0.257	-0.257	0.257	0.2
3	1	1	6	-0.914	0.914	0.457	0.343	-0.914	-0.457	-0.343	0.457	0.3
3	3	1	9	-0.9	0.9	0.3	-0.3	-0.9	-0.3	0.3	0.3	-0.3

Рисунок 3. Форма просмотра результатов.

На форме просмотра результатов представлена таблица. В ней содержатся следующие столбцы:

X, Y, Z – пространственные координаты центра окна;

n – количество исходных точек данных, участвующие в расчете параметров окна

t1_t2 – ранговая корреляция внутри окна между признаками t1 и t2;

t1_t3 – ранговая корреляция внутри окна между признаками t1 и t3;

...

t4_t5 – ранговая корреляция внутри окна между признаками t4 и t5.

Каждая строка в результирующей таблице – это описание окна.

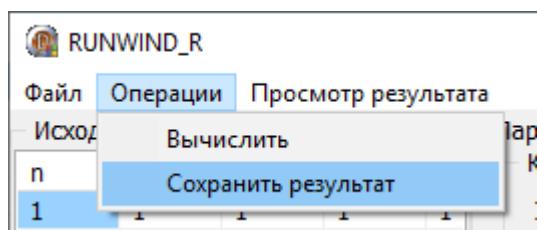


Рисунок 4. Пункт меню «Сохранить результат».

Чтобы сохранить результаты вычисления в файл, выбираем меню «Операции», «Сохранить результат» (рисунок 4) или нажимаем кнопку внизу формы «Сохранить». В появившемся стандартном диалоговом окне указываем имя файла, в который сохраним данные.

Литература к разделу 5.

1. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. — М.: Физматлит, 2006. — 816 с.

2. Ранговая корреляция [Электронный ресурс]// Хелпикс.Орг - Интернет помощник. URL: <https://helpiks.org/4-68195.html>(дата обращения: 10.11.2021).

**Генеральный
директор МАИН**



А.Ф.Цеховой