

## Комплекс методов обработки трехмерной цифровой геоинформации на основе вероятностно-статистического подхода

*С.Н. Гончаренко, И.Р. Радимов*

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»*

**Аннотация:** В работе предлагается решение геологических задач с помощью вероятностно-статистических методов. Приведены результаты использования спектрально-корреляционного анализа данных, реализующего процедуры обработки цифровой геоинформации, организованной в трехмерные регулярные сети. Рассмотрены возможности применения методов статистического, спектрального и корреляционного анализа, линейной оптимальной фильтрации, обнаружения слабых аномалий, классификации и распознавания образов. Проведен спектрально-корреляционный и статистический анализ геоданных, расчет спектров Фурье, различных корреляционных функций и градиентных характеристик геополей.

**Ключевые слова:** межпрофильная корреляция, самонастраивающаяся фильтрация, обнаружение слабых сигналов, геологическое районирование и картирование, пространственно распределенная информация.

Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий представляет собой упорядоченную совокупность аналитических и синтетических процедур извлечения информации из данных гравитационных и магнитных наблюдений при заданном объеме априорной информации с целью решения поставленной геологической задачи.

Рассматриваемый ниже комплекс методов был подобран для анализа трехмерной цифровой геоинформации, организованной в трехмерные, регулярные сети методами статистического, спектрального и корреляционного анализа, линейной оптимальной фильтрации, обнаружения слабых аномалий, классификации и распознавания образов.

Технология обработки данных предназначена для комплексного геологического анализа, позволяющего проводить полную спектральную корреляцию и статистический анализ геоданных. Она включает в себя расчет спектров Фурье, корреляционных функций и градиентных характеристик. Линейные оптимальные фильтры разбивают исходное поле на компоненты, уменьшая низкочастотное содержание. Алгоритмы адаптивной линейной фильтрации эффективно обрабатывают

нестационарные геополья. Такие методы, как межпрофильная корреляция, самонастраивающаяся фильтрация и обратные вероятности, помогают обнаруживать слабые сигналы на фоне помех. Алгоритмы анализа множества геологических и геофизических особенностей поддерживают геологическое районирование и картирование с использованием методов распознавания и классификации, основанных на обширных геофизических, геохимических и геологических данных.

Оригинальная база данных позволяет эффективно работать с цифровой пространственно распределенной информацией, организованной в трехмерные, регулярные сети. Сервисные функции базы данных обеспечивают обмен информацией между различными обрабатывающими системами, выполняют операции ввода/вывода, позволяют фрагментировать, объединять и дополнять сети, восполнять отсутствующие в сетях значения, осуществлять различные алгебраические преобразования над признаками и т.д.

Тренд-анализ и фильтрация геофизических геопольей занимают важнейшее место в обработке геолого-геофизических данных [1,2]. Их использование позволяет решать следующие задачи обработки и интерпретации геолого-геофизических наблюдений: разделения полей на составляющие с оценкой формы и параметров отдельных компонент; оценки формы низкочастотной трендовой составляющей геофизических полей [3]; выделения и оценки формы слабых аномалий, амплитуда которых соизмерима или меньше уровня помех [4].

Для уменьшения уровня шума использованы различные вариации метода минимизации среднеквадратичного отклонения (1-d, 2-d, 3-d Wiener filter). Для обработки геохимических, радиометрических, экологических геопольей применена энтропийная фильтрация [5, 6].

Каждая из моделей предполагает выполнение ряда сложных условий, продиктованных характером данных. Так как любая выборка геолого-физических данных неоднородна и состоит из большого набора случайных величин, то в модели необходимо учитывать такую нестационарность геополей. При этом спектральные характеристики геополя могут быть неизвестны заранее, но модель должна функционировать и отражать реальные геолого-физические условия. В модели для преобразования дискретных данных в сумму синусоидальных компонент разных частот используются преобразования Фурье, которые могут вызвать заметные выбросы, сильно искажающие реальную картину. Чтобы избежать этого, также необходимо осуществлять фильтрацию.

Поле было разбито на компоненты, используя двумерную адаптивную фильтрацию, адаптивную энергетическую фильтрацию, энтропийную фильтрацию, медианную фильтрацию и простое усреднение по окну, в результате чего получается несколько карт (рис. 1). На первой карте показан наиболее энергоемкий компонент (тренд), в то время как на последующих картах показаны менее энергоемкие компоненты, причем амплитуда конечного компонента сравнима с уровнем помех.

Непосредственное определение глубины главных аномалиеобразующих поверхностей производится с помощью анализа графика радиально осредненного логарифма амплитудного спектра исходного поля. Как можно судить из типичного вида графика, представленного на рис. 1, он четко подразделяется на три части. Первая его часть в области низких пространственных частот близка к прямой с большим угловым коэффициентом, практически равным глубине нижней магнитоактивной геологической границы. Вторая часть, в области средних пространственных частот, близка к прямой с меньшим угловым коэффициентом, равным глубине верхней магнитоактивной геологической

---

границы. Третья, самая высокочастотная часть спектра связана с помехами и не содержит геологической информации. Такая форма графика логарифма амплитудного спектра дает возможность автоматического определения глубин до двух магнитоактивных границ на основе выбора двух подходящих интервалов его аппроксимации прямыми линиями.

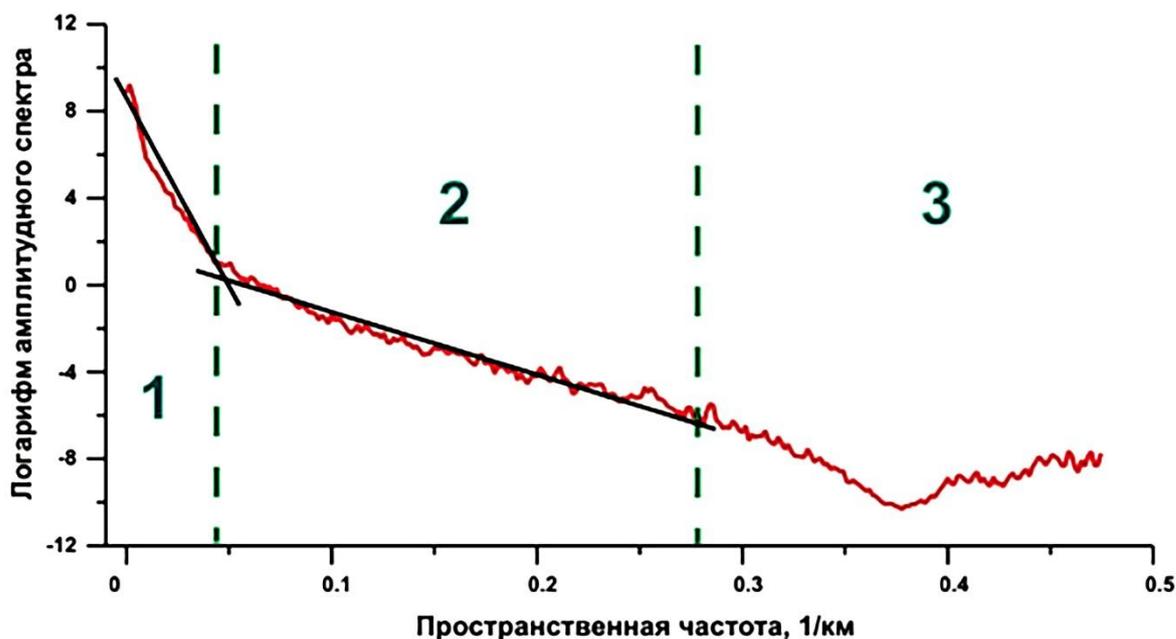


Рис. 1. - График логарифма радиально осредненного двумерного спектра Фурье магнитного поля с 3-мя выделенными частями: низкочастотной (1), среднечастотной (2) и высокочастотной (3)

Глубина поверхностей, образующих аномалии, определяется путем анализа усредненного по радиусу логарифма амплитудного спектра исходного поля, который обычно делится на три части. Низкочастотная часть, прямая линия с большим угловым коэффициентом, указывает на глубину нижней магнитно-активной границы. Среднечастотная часть, прямая линия с меньшим угловым коэффициентом, указывает на глубину верхней границы.

Наиболее заметная разница в градиенте графика на рисунке 1 происходит в указанных границах областей. На основании этого, полученный

график был разделен на низкочастотную (1), среднечастотную (2) и высокочастотную (3) части.

Полученные результаты подлежат корректировке в процессе совместной интерпретации с данными ДЗЗ и имеющимися данными бурения и сейсмических материалов. Вполне возможно, что положение поверхностей при сохранении локальных амплитуд может в региональном плане измениться за счет «реперных» отметок по данным бурения и сейсморазведки.

Построение трехмерной модели плотностных характеристик осуществляется на базе интегрированного использования статистических, спектрально-корреляционных методов и алгоритма адаптивной фильтрации. В результате обработки данных локального гравитационного поля получается трехмерное распределение плотностных характеристик в нижнем полупространстве площади исследования.

Многие фундаментальные работы по инфракрасным спектрам Земли были посвящены ближнему инфракрасному диапазону, за исключением диапазона 7-14 микрон [7], что привело к неправильным представлениям о дальних инфракрасных исследованиях. В настоящее время регистраторы излучения работают в субмиллиметровом диапазоне, между инфракрасным и микроволновым излучением. Тепловизионные изображения из космоса, фиксирующие излучение размером 7,5-13,5 мкм, отличаются от традиционных методов тем, что они отражают сигналы. При надлежащей обработке и декодировании тепловизионные ИК-изображения предоставляют важные данные для геофизической интроскопии эндогенного геотермодинамического поля.

Суть метода дистанционной термометрии основана на известном положении, что в тепловой энергии, излучаемой любым объектом, заключена информация о глубинных процессах, происходящих внутри

---

объекта. Глубинное тепловое поле пронизывает земную кору и рассеивается в космическом пространстве. Последней поверхностью излучения тепловой радиации недр является дневной рельеф. Излученную ею энергию в космосе на высоте 700 км фиксирует тепловой радиометр. В исходной матрице наблюдаемых значений содержатся сигналы от гелиозоны и эндотермики. Сигналы от последних различаются по пространственно-частотным параметрам. На основе дифференцированности этих параметров тепловизионное зондирование глубинного строения термодинамического поля Земли выполняется последовательным увеличением температурной чувствительности и селективным погоризонтальным проникновением вглубь геологического разреза.

Первичная (техническая) обработка исходного массива тепловых ИК данных включала привязку с точностью  $\pm 60$  м, устранение помех, топокоррекцию, увязку, сшивку с соседними массивами, улучшение пространственного разрешения, архивацию.

Термометрическая обработка по тематическим алгоритмам осуществлялась в следующей последовательности: увеличение температурного разрешения и селективная погоризонтальная фильтрация, контрастирование геотермических аномалий и их визуализация, построение вертикальных разрезов интенсивности теплового излучения до глубины 2 км, построение карт интенсивности теплового излучения по латеральным срезам на глубинах 300, 600, 900, 1200, 1500 и 2000 м, построение вертикальных разрезов градиента теплового излучения по профилям до глубины 2000 м, построение карт вертикального градиента теплового излучения по латеральным срезам на глубинах 300, 600, 900, 1200, 1500 и 2000 м.

Геофизическая и флюидодинамическая интерпретация термометрических данных включала следующие операции: выделение по

---

разрезам главных границ гидродинамических этажей, термофлюидодинамических блоков и определение направлений термофлюидодинамики (тепломассопереноса); по геотермическим картам латеральных срезов составляются термофлюидодинамические карты.

Поисковая интерпретация осуществлялась на основе геологических, геотермических и флюидодинамических критериев.

Цифровой массив тепловых ИК снимков явился информационной основой осуществления томографической интроскопии эндогенного геотермического поля и определения флюидодинамических ситуаций и аномалий [8].

Зона интенсивной вертикальной конвекции обычно совпадает с гидродинамическим уровнем свободного водообмена, где преобладают инфильтрационные воды, движимые гидростатическим давлением. Здесь жидкости движутся вниз под действием градиента гидростатического давления, и интенсивность нисходящих холодных потоков резко снижается. Вертикальные линейные аномалии уступают место более крупным изомерным и боковым аномалиям, соответствующим гидродинамическому уровню замедленного водообмена, где на движение воды влияет как гидростатическое, так и геостатическое давление, а связь с районами подачи грунтовых вод менее очевидна.

Графические результаты проведенных преобразований представлены комплектами карт двух уровней проработки исходной информации.

Первый уровень – это количественное геофизическое дешифрирование цифровых тепловизионных изображений теплового ИК диапазона. Сюда входят карты геотермического поля и разрезы. Эти базисные карты многократного пользования, подлежащие повторным интерпретациям по мере поступления новых геолого-геофизических и геохимических данных.

---

Карта глубины  $h$  отображает латеральное изменение величины вертикального градиента в предельно тонком слое, находящемся на глубине  $h$ . Тонкому слою соответственно отвечает узкий диапазон величин градиента.

В разрезе показано, как интенсивность теплового излучения изменяется по вертикали, при этом аномалии становятся менее заметными на больших глубинах. Такая картина обусловлена уменьшением конвективного тепло- и массообмена, ослаблением гравитационного проникновения, а также увеличением плотности и плотной плотности среды. В разделе представлены области повышенного теплового потока, изотермические купола и направления холодного и теплого потоков. Эти разделы помогают определить динамику жидкости, направление движения, а также области защиты и накопления жидкости.

Второй уровень проработки исходной информации – это тематическая геолого-флюидодинамическая интерпретация на уровне имеющихся опорных геолого-геофизических данных. От полноты и комплексности опорных данных зависит обоснованность и точность интерпретации. По мере получения и привлечения новых фактов достоверность результатов тематической интерпретации будет повышаться [9].

Гидродинамическая интерпретация направлена на выявление проницаемых зон для восходящего дренажа глубинных и артезианских вод, определение местоположения "окон" потока артезианской воды, отслеживание инфильтрационных потоков, изоляцию тепловыделяющих блоков и выявление тектонических экранов. Карта геотермальных полей показывает сложную дифференциацию, обусловленную блочной структурой палеозойских комплексов, которая становится более выраженной с глубиной. Ключевые особенности включают интенсивность геотермальных полей, максимумы горизонтального градиента, внутреннюю

---

дифференциацию аномалий, а также ориентацию и форму локальных аномалий вертикального градиента.

При прослеживании их границ учитывались не только максимумы горизонтального градиента, но и торцевые несогласия линейных аномалий [10, 11]. При обобщении результатов интерпретации выяснилось, что границами термофлюидодинамических блоков служат разрывные нарушения сбросо-сдвигового типа, проницаемые зоны инфильтрации и проницаемые зоны флюидизации. Поэтому на картах результатов интерпретации межблоковые границы местами выглядят в виде цепи чередующихся разрывных нарушений и зон проницаемости.

Проницаемые зоны восходящего псевдооживления отмечены узкими линейными "теплыми" аномалиями, в то время как зоны нисходящей инфильтрации обозначены "холодными" аномалиями в геотермальном поле. "Флюиды" относятся ко всем восходящим потокам с аномально высокой температурой, независимо от их состава — грунтовым водам, минерализованной воде, углеводородным флюидам или газам. Если эти флюиды просачиваются вниз, в более теплую среду, они классифицируются как инфильтрация. Таким образом, воды элизиума из открытых зон сброса могут попадать в инфильтрационные каналы. Разложение гравитационного, магнитного и теплового полей на составляющие показывает взаимосвязь между региональными и локальными структурами.

Оценки глубин главных гравиактивных и магнитоактивных поверхностей характеризуют морфологию глубинного строения участков, а результаты выделения протяженных локальных аномалий дают представление об анизотропии тектонических структур, причем зоны высоких градиентов картируют разломы, а положительные и отрицательные аномалии - соответственно зоны уплотнений и разуплотнений в разрезе.

На рис. 2 представлены результаты пересчета в нижнее полупространство гравитационного и теплового полей, что является фильтром высоких частот и позволяет усиливать локальные аномалии, слабо проявляющиеся на исходной карте при наличии регионального фона. При продолжении аномалий в нижнее полупространство региональная аномалия возрастает медленнее, чем локальная, т.е. локальная аномалия выделяется в общем поле рельефнее.

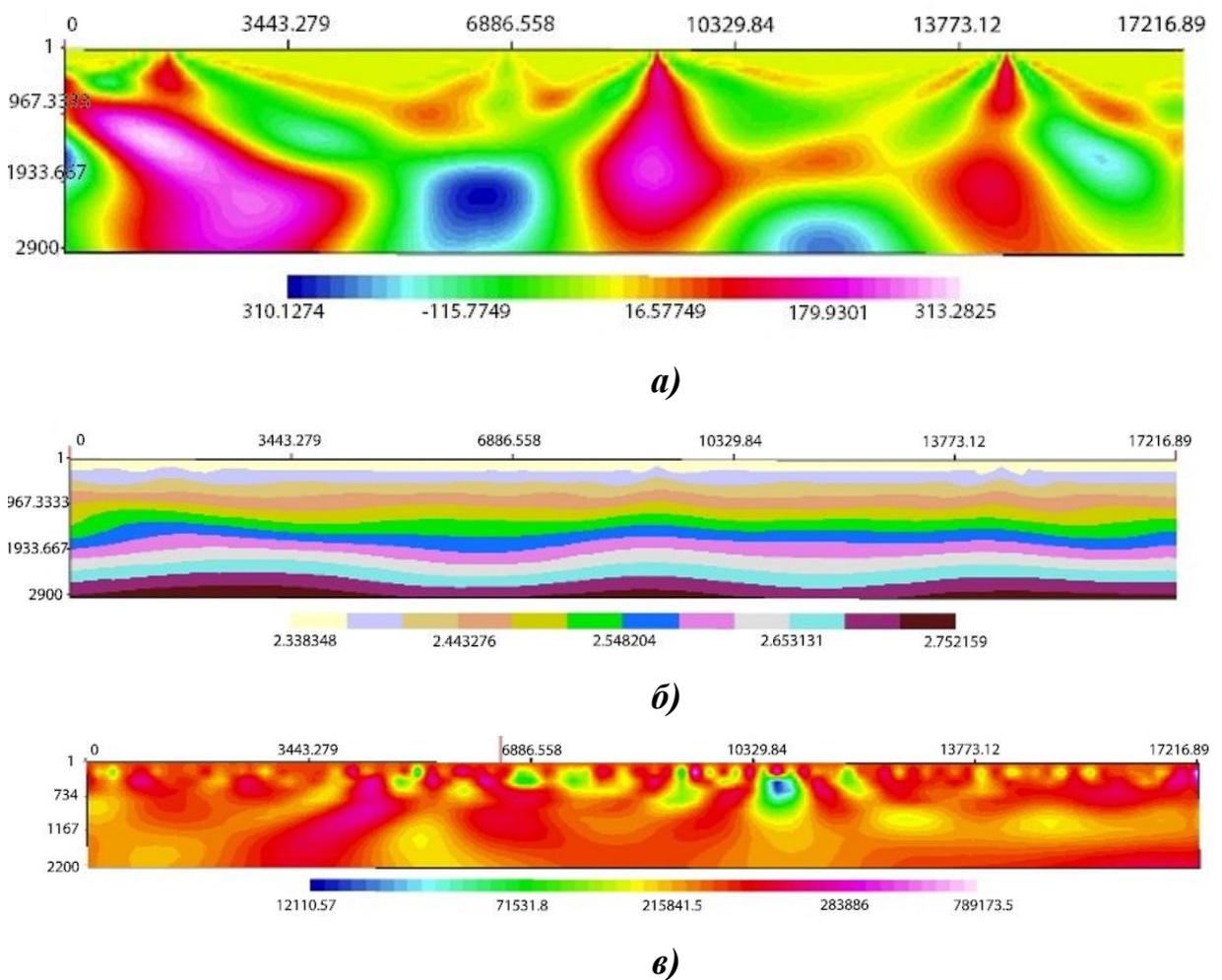


Рис. 2. - Результаты пересчета в нижнее полупространство гравитационного и теплового полей а) пересчет в нижнее полупространство гравитационного поля; б) распределение плотностей; в) пересчет в нижнее полупространство теплового поля



Результаты пересчета в нижнее полупространство элементов теплового поля, как уже указывалось выше, позволяют оценить флюидо-динамическую картину на исследуемых площадях. Так, положительные аномалии градиента теплового потока указывают на зоны возможного развития флюидных систем, по которым переносится эндогенное тепло в верхнюю часть разреза. Отрицательные аномалии градиента теплового потока указывают на зоны возможного развития инфильтрационных систем, привносящих холодные воды в верхнюю часть разреза. Одним из важных выводов проделанной работы является установление приуроченности оруденения к зонам отрицательных аномалий градиента теплового поля. Это вывод подтверждается и результатами выделения протяженных отрицательных аномалий теплового поля на исследуемых участках.

Таким образом, все полученные материалы и сделанные по ним выводы подтверждают высокую информативность комплекса примененных методов обработки данных, а также дают основу для продолжения исследований в этом перспективном направлении.

## Литература

1. Гончаренко С.Н., Бердалиев Б.А. Методы прогнозирования и оценки техногенного и остаточного скопления урановых руд на месторождениях, обрабатываемых способом подземного скважинного выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 5, С.43-48. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-43-48.
  2. Гончаренко С.Н., Бердалиев Б.А. Повышение эффективности управления горнодобывающего предприятия на основе исследования системных связей технологических переделов и моделей данных процессов технического перевооружения // Вопросы радиоэлектроники. 2017. №11. С. 77-82.
  3. Ахмадуллин Ф.Ф., Гильманова Р.Х., Грищенко А.С., Михеев Ю.В., Осепян С.С. Особенности 3D геологического моделирования локальных клиноформ пласта БВ10/1-2 Самотлорского месторождения // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2009. №12. С. 38-41.
  4. Гладков Е.А. О корректности 3D геолого-технологических моделей месторождений углеводородов // Oil & Gas Journal Russia. 2013. Январь-февраль. С. 50-55.
  5. Гончаренко С.Н. Геопространственное обеспечение и методы построения программы аналитического контроля качества проведения геологоразведочных работ на месторождении // Вестник СГУГиТ. 2021. – Т. 26. № 3. С. 71–86. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-3-71-86.
  6. Забоева А.А. Разработка методик трехмерного геомоделирования в условиях неоднородности и неравномерности геологогеофизической информации (на примере месторождений Западной Сибири) : дис. на соискание ученой степени к-та геологоминералогических наук. Тюмень, 2012. 154 с.
-

7. Байков В.А., Бакиров Н.К., Яковлев А.А. Математическая геология: Т.1: Введение в геостатистику. М.: Ижевск. Институт компьютерных исследований, 2012. 228 с.
8. Ковалевский Е.В. Геологическое моделирование на основе геостатистики. Учебный курс. М. ОАО «Центральная геофизическая экспедиция (ЦГЭ)», 2011. 119 с.
9. Мангазеев В.П., Белозеров В.Б., Кошовкин И.Н., Рязанов А.В. Методика отображения в цифровой геологической модели литолого-фациальных особенностей терригенного коллектора // Нефтяное хозяйство. 2006. №5. С. 66-70.
10. Потехин Д.В. Оптимизация технологии многовариантного трехмерного геологического моделирования залежей нефти и газа: дис. на соискание ученой степени к-та техн. Наук, Пермь, 2014. 151 с.
11. Ромичева Е. В. Методы обработки и визуализации больших данных // Аллея науки. 2017. Т. 3. № 16. С. 976–982.

### References

1. Goncharenko S.N., Berdaliev B.A. Gorny`j informacionno-analiticheskij byulleten. 2018. № 5, pp. 43-48. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-43-48.
  2. Goncharenko S.N., Berdaliev B.A. Voprosy` radioe`lektroniki. 2017. №11. pp. 77-82.
  3. Axmadullin F.F., Gil`manova R.X., Grishhenko A.S., Mixeev Yu.V., Osepyan S.S. Geologiya, geofizika i razrabotka neftyany`x i gazovy`x mestorozhdenij. 2009. №12. pp. 38-41.
  4. Gladkov E.A. Rossijskij neftegazovy`j zhurnal. 2013. pp. 50-55.
  5. Goncharenko S.N. Vestnik SGUGiT. 2021. Т. 26. № 3. pp. 71–86. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-3-71-86.
-

6. Zaboeva A.A. Razrabotka metodik trexmernogo geomodelirovaniya v usloviyax neodnorodnosti i neravnomernosti geologogeofizicheskoy informacii (na primere mestorozhdenij Zapadnoj Sibiri): diss. na soiskanie uchenoj stepeni k-ta geologomineralogicheskix nauk. [Development of methods for three-dimensional geomodeling in conditions of heterogeneity and unevenness of geological and geophysical information (using the example of deposits in Western Siberia) : diss. for the degree of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences] Tyumen`, 2012. 154 p.

7. Bajkov V.A., Bakirov N.K., Yakovlev A.A. Matematicheskaya geologiya: T.1: Vvedenie v geostatistiku [Mathematical Geology: Vol.1: Introduction to Geostatistics]. M.: Izhevsk. Institut komp`yuterny`x issledovaniy, 2012. 228 p.

8. Kovalevskij E.V. Geologicheskoe modelirovanie na osnove geostatistiki. Uchebny`j kurs [Geological modeling based on geostatistics. The training course]. M. OAO «Central`naya geofizicheskaya e`kspediciya (CzGE`) », 2011. 119 p.

9. Mangazeev V.P., Belozerov V.B., Koshovkin I.N., Ryazanov A.V. Neftyanoe khozyajstvo. 2006. №5. pp. 66-70.

10. Potexin D.V. Optimizaciya texnologii mnogovariantnogo trexmernogo geologicheskogo modelirovaniya zalezhej nefti i gaza: dis. na soiskanie uchenoj stepeni k-ta texn. nauk [Optimization of the technology of multivariate three-dimensional geological modeling of oil and gas deposits: diss. for the degree of Candidate of Technical Sciences], Perm`, 2014. 151 p.

11. Romicheva E. V. Alleya nauki. 2017. T. 3. № 16. pp. 976–982.

**Дата поступления: 3.06.2024**

**Дата публикации: 25.07.2024**