

УДК 556.3.01.06:553.31  
DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4232  
Шифр специальности ВАК: 25.00.07

## Системно-модельный анализ при оценке гидрогеологических условий месторождений полезных ископаемых Восточной Сибири

Л.И. Аузина✉

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, г. Иркутск*

✉ auzina@istu.edu

**Аннотация.** *Актуальность* исследования обусловлена тем, что в условиях сложной структурно-тектонической обстановки, недостаточности и неравномерности геолого-гидрогеологической изученности месторождений полезных ископаемых Восточной Сибири наиболее остро стоит вопрос оптимизации гидрогеологических работ и снижения финансовых затрат на их проведение. *Цель:* выделение ряда легко определяемых, косвенных показателей, предопределяющих выбор перспективных для бурения гидрогеологических скважин участков. *Методы.* Для повышения эффективности проектируемых работ использовался системно-модельный анализ, состоящий из двух этапов. Первый этап – обучение – базируется на использовании метода главных компонент и завершается составлением классификационной таблицы объектов-эталонов (хорошо изученных в геолого-гидрогеологическом отношении) в соответствии с выделенными наиболее значимыми, но легко доступными косвенными показателями. Второй этап – распознавание или прогноз – заключается в выявлении принадлежности объектов-аналогов (со слабо или совсем не изученными геолого-гидрогеологическими условиями) к тому или иному классу, определенному на первом этапе. При решении данной задачи используются программы, реализующие кластерный и множественный регрессионный анализы. В результате в соответствии с поставленной задачей классифицируются объекты-аналоги. *Результаты.* Разработанная методика получила разноцелевое применение, в том числе при структурно-гидрогеологическом районировании Илимского плато, к которому приурочены основные железорудные месторождения Восточной Сибири, типизации россыпных месторождений Ленского золоторудного района по степени сложности инженерно-гидрогеологических условий, а также выделению участков повышенной водообильности на месторождениях нефтегазового комплекса Восточной Сибири. Полученные результаты позволяют рекомендовать метод для широкого внедрения в практику гидрогеологических исследований с целью оптимизации видов и объемов специальных работ на месторождениях полезных ископаемых для выявления наиболее водообильных зон при разработке систем водопонижения и водоснабжения, при разномасштабном структурно-гидрогеологическом районировании. Кроме того, метод системно-модельного анализа с учетом введения дополнительных способов обработки может найти и уже находит широкое применение при работе с базами данных и типизации объектов по эколого-гидрогеологическим показателям.

**Ключевые слова:** системно-модельный анализ, оптимизация гидрогеологических исследований, Восточная Сибирь, комплексный показатель

**Для цитирования:** Аузина Л.И. Системно-модельный анализ при оценке гидрогеологических условий месторождений полезных ископаемых Восточной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 1. – С. 90–101. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4232

---

UDC 556.3.01.06:553.31  
DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4232

## System model analysis in estimating hydrogeological conditions of Eastern Siberia mineral deposits

L.I. Auzina✉

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation*

✉ auzina@istu.edu

**Abstract. Relevance.** The conditions of complex structural and tectonic setting, insufficiency and uneven geological and hydrogeological exploration of mineral deposits in Eastern Siberia determine the relevance of the issues of optimization of hydrogeological works and reduction of their implementation costs. **Aim.** Identification of a number of readily defined, indirect indicators that predetermine the selection of sites promising for drilling hydrogeological wells. **Methods.** The two-stage method of system-model analysis was used to improve the efficiency of the project work. The first stage is training. It involves the use of the principal component analysis and ends with the compilation of a classification table of standard objects (thoroughly studied in geological and hydrogeological terms) in accordance with the earlier identified most significant indirect indicators but easily accessible ones. The second stage is recognition or forecast. It includes attribution of analogous objects (with poorly or unstudied geological and hydrogeological conditions) to certain classes determined at the first stage. When solving this problem, the programs implementing cluster and multiple regression analyses are used. As a result, the analogous objects are classified in accordance with the task set. **Results.** The developed methodology is used for various purposes: for structural hydrogeological zoning of the Ilim-Lena plateau with associated main iron ore deposits of Eastern Siberia, for typification of alluvial deposits of the Lena gold ore region according to the complexity degree of engineering hydrogeological conditions, for identification of sites featuring increased water abundance in the fields of the oil and gas complex of Eastern Siberia. The results obtained make it possible to recommend the method to be widely introduced into the practice of hydrogeological research. It is necessary for optimizing the types and volumes of special works at mineral deposits in order to identify the most water-abundant zones when developing dewatering and water supply systems under different-scale structural hydrogeological zoning. In addition, the method of system-model analysis provisioned with additional processing methods has a potential and is already widely used when dealing with databases and object typification according to environmental and hydrogeological indicators.

**Keywords:** System model analysis, hydrogeological study optimization, Eastern Siberia, complex indicator

**For citation:** Auzina L.I. System model analysis in estimating hydrogeological conditions of Eastern Siberia mineral deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 1, pp. 90–101. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4232

---

## Введение

В условиях сложной структурно-тектонической обстановки, недостаточности и неравномерности геолого-гидрогеологической изученности, которые характерны для месторождений полезных ископаемых Восточной Сибири, значительные трудности возникают при схематизации природных условий, оптимизации видов и объемов специальных исследований для последующих стадий изучения. В этих случаях весьма эффективно применение метода системно-модельного анализа. В контексте данного исследования под системно-модельным анализом понимается реализация схемы «свойства–отношения–объект» [1], где эти элементы, находящиеся в определенных отношениях между собой и с внешней средой, представляют структурно-функциональное единство, то есть систему [2–4]. Таким образом, наиболее важным понятием в этом случае является понятие системы, представляющей собой совокупность объектов, отдельных компонентов и показателей, образующих некоторую целостность, обладающую новыми свойствами, которых не имели составляющие ее элементы [5, 6].

Разработанная для реализации поставленной задачи методика анализа данных базируется на широко используемых и достаточно давно применяемых методах многомерной статистики [7–11].

## Материалы и методы

При превалировании качественных признаков над количественными, что характерно для геолого-

гидрогеологической информации исследуемого региона, применяется эвристический алгоритм, включающий два основных этапа работы.

Первый этап – обучение, в процессе которого создаются два файла: F1 – файл, представляющий собой совокупность исходных данных по всем точкам объектов-эталонов (то есть участков, наиболее полно изученных в гидрогеологическом отношении); F2 – файл градаций, являющийся комплексом пронумерованных диапазонов изменений всех параметров. В результате совместной работы файлов F1 и F2 создается файл F, в котором вся исходная информация представляется в качественном виде по номерам градаций файла F2. С целью минимизации возможной ошибки при выявлении неявных закономерностей между признаками методом главных компонент исходные данные линейно преобразуются в некоррелируемые комбинации с убывающими дисперсиями [12]. Для преодоления неинвариантности, вызванной заданием исходной информации в разных размерностях, используются три вида их преобразования, составленные для абсолютных, относительных по размаху и нормированных исходных величин (файл F2).

При первом способе преобразования появляется возможность судить о роли (весе) каждой переменной по значениям компонент базисных векторов. Вычисление главных компонент по абсолютным значениям приводит к выявлению наиболее динамичных элементов, определяющих переменные состояния гидрогеологических объектов и их взаимоотношения.

При втором способе преобразования исходных данных выделяются фоновые типы, отличающиеся постоянством и характерностью, обусловленные микрогидрогеологическими закономерностями (например, изменение гидрогеохимических показателей).

Третий вариант преобразования – использование нормированных исходных величин, позволяющее дифференцировать объекты в соответствии с внутрирайонным гидрогеологическим разнообразием (например, по структурно-гидрогеологическому признаку).

Затем на этапе обучения вычисляется вероятность принадлежности объектов к заданным априори классам. При этом используется программа, в которой реализована формула Бейеса [2]. В качестве классов могут рассматриваться отдельные гидрогеологические структуры, месторождения, характеризующиеся различной сложностью геолого-гидрогеологических условий, территории и участки с различной степенью водообильности.

Заканчивается процесс обучения составлением классификационной таблицы объектов-эталонов. Сходимость полученной классификационной таблицы и ранее заданных по геолого-гидрогеологическим признакам классов является критерием достоверности результатов I этапа.

Второй этап – распознавание, или прогноз, то есть выявление принадлежности объектов-аналогов (слабо или вообще не охарактеризованных в гидрогеологическом отношении) к тому или иному классу. Поскольку объекты-аналоги в гидрогеологическом смысле охарактеризованы недостаточно, в качестве классификационных показателей (факторов) для них выбираются наиболее обобщенные и весомые, выделенные методом главных компонент (например, структурно-гидрогеологический, геоморфологический, геокриологический, положение в пространстве и т. д. – это показатели, которые можно оценить в предполевой период). На этом этапе используются программы, реализующие кластерный и множественный регрессионный анализы [12–15].

Логическая модель кластерного анализа заключается в том, что каждый исследуемый объект, характеризующийся набором факторов, представляется в  $n$ -мерном пространстве, определяемом фиксированным числом показателей. С помощью выбранной меры сходства произвольное множество объектов классифицируется, что осуществляется по степени связи между точками и средними значениями свойств групп по так называемому «кластеру по центру групп» [2, 3, 9]. Классифицируются не только объекты, но и их признаки, таким образом вычисления проводятся как для столбцов, так и для строк матрицы.

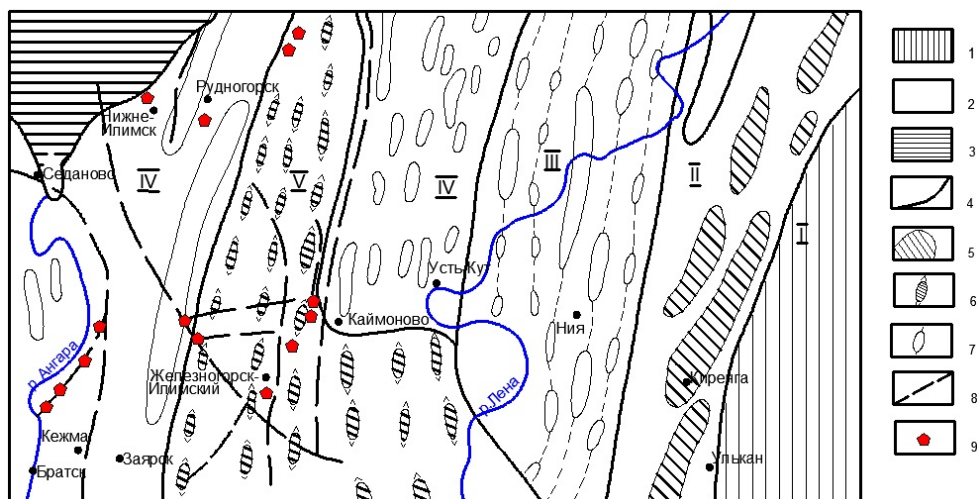
Далее используется множественный регрессионный анализ, в ходе которого рассматриваются уравнения с одним предиктором, затем все сочетания с двумя предикторами и т. д. На каждом этапе выбирается наилучшее уравнение, о чем свидетельствует максимум коэффициента множественной корреляции и минимум его ошибки и доли остаточного отклонения от уравнения регрессии.

В результате реализации второго этапа объекты-аналоги классифицируются и начатая на первом этапе таблица завершается.

### Результаты исследования

Описанная методика получила разноцелевое применение. Наиболее полно возможности ее реализации можно продемонстрировать на примерах *структурно-гидрогеологического районирования Илимско-Ленского плато*, к которому приурочены основные железорудные месторождения Восточной Сибири, типизации россыпных месторождений Ленского золоторудного района по степени сложности гидрогеологических условий, выделения участков повышенной водообильности на месторождениях нефтегазового комплекса.

Илимско-Ленское плато, в пределах которого находится более 50 железорудных месторождений и рудопоявлений, расположено в центральной части Ангаро-Ленского краевого прогиба (рис. 1). В распределении и формировании подземных вод региона ведущую роль играют геолого-структурные факторы, обусловившие различное положение разновозрастных толщ в пространстве, что привело к достаточно четкому разделению зон свободного и затрудненного водообменов, резкой фильтрационной неоднородности водовмещающих пород, различиям в химическом составе и т. д. По этому региону проанализированы данные по 370 естественным выходам оруденения и 120 скважинам, вскрывшим оруденение на значительной глубине. Точки наблюдения весьма неравномерно распределены по площади, наибольшая концентрация соответствует районам месторождений и крупным населенным пунктам. Эти участки рассматривались как объекты-эталоны. Каждая точка наблюдения охарактеризована 22 признаками, в том числе положением точки в пространстве, ее структурной и геоморфологической приуроченностью, мощностью обводненных пород верхней гидродинамической зоны, абсолютной отметкой кровли регионального водоупора, фильтрационными характеристиками водовмещающих пород, коэффициентом динамичности годового стока, минерализацией и химическим составом подземных вод, а также рядом других, менее значимых показателей.



**Рис. 1.** Схема структурно-тектонического районирования центральной части Ангаро-Ленского краевого прогиба (масштаб 1:3000000) [3]: Геологические структуры первого порядка: 1 – Байкальская складчатая область; 2 – Ангаро-Ленский краевой прогиб; 3 – Тунгусская синеклиза. Геологические структуры второго порядка: 4 – границы структур четвертого порядка; I – Прибайкальский синклиналь, II – Лено-Киренский антиклиналь, III – Марковско-Ичерская зона брахиформных складок, IV – Непское сводовое поднятие, V – Илим-Ленская зона брахиформных структур. Геологические структуры третьего порядка: 5 – линейные антиклинальные складки; 6 – брахиформные антиклинальные складки; 7 – изолированные антиклинальные складки; 8 – разломы, инъецированные траппами; 9 – трубки взрыва

**Fig. 1.** Diagram of structural-tectonic zoning of the central part of the Angara-Lena foredeep (map scale 1:3000000) [3]: Geological structures of the first order: 1 – Baikal folded region; 2 – Angara-Lena foredeep; 3 – Tunguska syncline. Geological structures of the second order: 4 – boundaries of the fourth order structures; I – Baikal syncline, II – Lena-Kirenska anticline, III – Markovsko-Icherskaya zone of brachiform folds, IV – Nepa arched uplift, V – Ilim-Lena zone of brachiform structures. Geological structures of the third order: 5 – linear anticlinal folds; 6 – brachyform anticlinal folds; 7 – isolated anticlinal folds; 8 – trap-injected faults; 9 – diatremes

При составлении файла грааций F2 в качестве наиболее значимых характеристик определены: морфология гидрогеологических структур, мощность верхней гидродинамической зоны (ВГДЗ), уровень подземных вод ВГДЗ, дебиты родников, коэффициенты водопроводимости вмещающих пород, коэффициенты динамичности родникового стока (табл. 1).

В соответствии со структурно-тектонической соподчиненностью в каждом таксоне 2-го порядка были выделены более мелкие структуры. Так, в пределах Илим-Ленского плато оконтурены брахиформные (синклинальные и антиклинальные) структуры и отдельные тектонические нарушения (рис. 1).

Далее по той же схеме детализировались районы ряда железорудных месторождений (Коршуновского, Капаевского, Нерюндинского, Полиевского, Байкальского) [16]. Рудные тела локализуются в структурах типа «трубок взрыва», сложенных скарново-рудными образованиями. Последние прорывают толщу осадочных пород палеозойского возраста, состоящую преимущественно из аргиллитов, алевролитов, песчаников. Отложения достаточно интенсивно смяты в складки, характер которых контролируется положением кровли регионального водоупора – преимущественно глинистыми средне-верхнекембрийскими

породами. Эти отложения являются нижней границей зоны свободного водообмена, в пределах которой проводилось районирование. На первом этапе исследования (обучении) в результате анализа данных по объектам-эталонам в районах выделены гидрогеологические бассейны высоких порядков, массивы, обводненные и экранирующие разломы; составлены карты изогипс и фильтрационных параметров по весьма ограниченному объему исходной информации [1].

Гидрогеологические бассейны подразделены на брахисинклинальные и брахиантиклинальные. Мощность обводненной зоны в брахисинклинальных бассейнах, как в наиболее крупных коллекторах трещинно-пластовых подземных вод, достигает 500 м, уровень воды вскрывается на глубине до 100 м, дебиты родников изменяются от 5 до 20 л/с, коэффициенты водопроводимости составляют 300–600 м<sup>2</sup>/сут., коэффициент динамичности родникового стока не превышает 1,7, что свидетельствует о стабильности гидродинамического режима в пределах этих зон. В брахиантиклинальных бассейнах обводненная мощность составляет 50–200 м, уровень подземных вод вскрывается на глубинах от 2,5 до 20 м, дебиты родников – 2,5–5 л/с, коэффициент динамичности изменяется от 2,6 до 3,1.

**Таблица 1.** Характеристика гидрогеологических структур Илимско-Ленского плато

**Table 1.** Characteristics of Ilimo-Lena Plateau hydrogeological structures

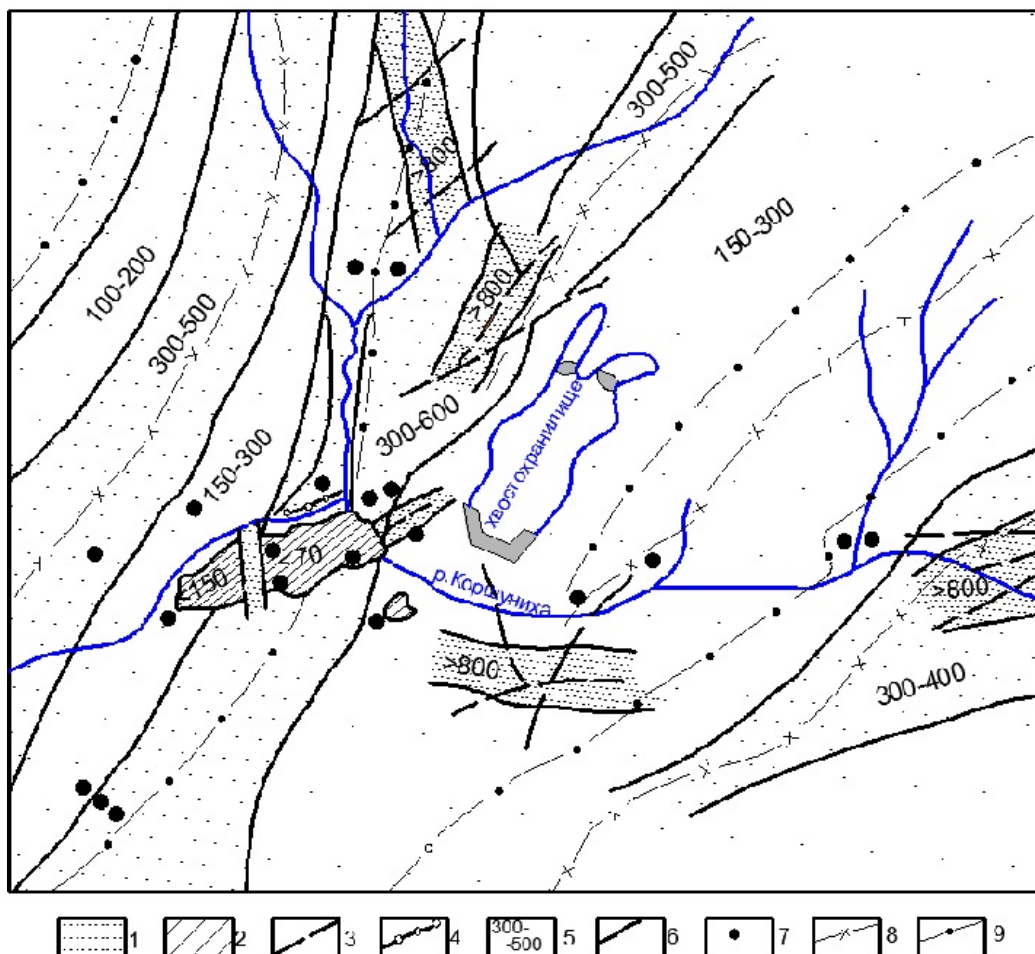
| Основные критерии/The main criteria                                                |                                                                               |                                                         |                                         |                                                                                           |                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Морфология гидрогеологических структур<br>Morphology of hydrogeological structures | Абс. отм. подошвы ВГДЗ, м<br>Elevation mark of the upper hydrodynamic zone, m | Гидродинамические показатели<br>Hydrodynamic indicators |                                         |                                                                                           |                                                                                |
|                                                                                    | Мощность ВГДЗ, м<br>The upper hydrodynamic zone thickness, m                  | Уровень подземных вод, м<br>Groundwater level, m        | Дебит родников, л/с<br>Spring rate, l/s | Коэффициент водопроницаемости, м <sup>2</sup> /сут<br>Transmissivity, m <sup>2</sup> /day | Коэффициент динамичности родникового стока<br>Spring flow dynamism coefficient |
| Гидрологические бассейны/Hydrological basins                                       |                                                                               |                                                         |                                         |                                                                                           |                                                                                |
| III порядок/III level                                                              |                                                                               |                                                         |                                         |                                                                                           |                                                                                |
| Брахисинклинальные<br>Brachysynclinal                                              | 420 – 500<br>200 – 500                                                        | до 100<br>up to 100                                     | 5,0–20,0                                | 640                                                                                       | 1,4–1,7                                                                        |
| Брахiantiклинальные<br>Brachyantiklinal                                            | 300 – 400<br>50 – 200                                                         | 1,5–20                                                  | 2,0–5,0                                 | 550                                                                                       | 2,6–3,1                                                                        |
| Линейные<br>Linear                                                                 | 400 – 560<br>до 150/up to 150                                                 | до 70<br>up to 70                                       | до 3,5<br>up to 3,5                     | 420                                                                                       | –                                                                              |
| IV порядок/IV level                                                                |                                                                               |                                                         |                                         |                                                                                           |                                                                                |
| Впадины/Structural basins:                                                         |                                                                               |                                                         |                                         |                                                                                           |                                                                                |
| Брахисинклинальные<br>Brachysynclinal                                              | 420 – 450<br>200 – 300                                                        | 60–100                                                  | 7,0–20,0                                | 160–600                                                                                   | 1,32–1,5                                                                       |
| Брахiantiклинальные<br>Brachyantiklinal                                            | 300 – 350<br>50 – 100                                                         | 10–20                                                   | 3,0–5,0                                 | 150–500                                                                                   | 2,2–2,8                                                                        |
| Поднятия/Structural highs                                                          |                                                                               |                                                         |                                         |                                                                                           |                                                                                |
| Брахисинклинальные<br>Brachysynclinal                                              | 450 – 500<br>400 – 500                                                        | 40–60                                                   | 5,0–7,0                                 | 200–640                                                                                   | 1,56–1,7                                                                       |
| Брахiantiклинальные<br>Brachyantiklinal                                            | 350 – 400<br>100 – 200                                                        | 1,5–10                                                  | 2,0–3,0                                 | 180–550                                                                                   | 3,0–3,5                                                                        |
| Гидрогеологические массивы/Hydrological massifs                                    |                                                                               |                                                         |                                         |                                                                                           |                                                                                |
| Линейные<br>Linear structures                                                      | до 650<br>до 40/up to 40                                                      | 25–30                                                   | 0,2–0,5                                 | до 150<br>up to 150                                                                       | 4–6                                                                            |
| Кольцевые<br>Ring structures                                                       | 280<br>до 280/up to 280                                                       | до 160<br>up to 160                                     | до 1,5<br>up to 1,5                     | 280                                                                                       | 5–6                                                                            |
| Обводненные разломы/Flooded faults                                                 |                                                                               |                                                         |                                         |                                                                                           |                                                                                |
| Приповерхностные<br>Subsurface faults                                              | 500<br>до 500/up to 500                                                       | 2–8                                                     | 30–80                                   | до 1700<br>up to 1700                                                                     | –                                                                              |
| Глубокие<br>Deep faults                                                            | 500<br>700 и более/700 or more                                                | до 20<br>up to 20                                       | 5,0–20                                  | до 800<br>up to 800                                                                       | –                                                                              |

Следующий тип структур – гидрогеологические массивы, к которым отнесены в данном случае «трубки взрыва», охарактеризованные как кольцевые массивы, имеющие четкие границы. Они слабообводнены в зоне экзогенного выветривания. Уровень трещинно-грунтовых вод вскрывается на глубине до 160 м, дебиты родников не превышают 1,5 л/с, коэффициент водопроницаемости составляет до 150 м<sup>2</sup>/сут., коэффициент динамичности родникового стока достигает 5–6.

Последним и наиболее сложно идентифицируемым типом структур являются разломы – обводненные и экранирующие. В обводненных разломах уровень трещинно-жильных подземных вод вскрывается на глубинах от 2 до 20 м, дебиты родников достигают 80 л/с, а коэффициенты водопроницаемости нередко превышают 1000 м<sup>2</sup>/сут.

На втором этапе работы анализировались точки наблюдения, слабо охарактеризованные в гидрогео-

логическом отношении (объекты-аналоги). Они классифицировались по трем основным признакам, выделенным на этапе обучения: мощности обводненных пород верхней гидродинамической зоны, абсолютной отметке кровли регионального водопора и коэффициенту динамичности родникового стока. Эти характеристики могут быть получены без проведения специальных работ для любого интересующего объекта. Все точки наблюдения – аналоги после соответствующей обработки – были отнесены к тем или иным выделенным в регионе структурам. В результате выполнения второго этапа моделирования были составлены схемы структурно-гидрогеологического районирования участков ряда железорудных месторождений (в частности Коршуновского (рис. 2)), что позволило оценить степень и характер водообильности водовмещающих отложений и оптимизировать структуру дренажных систем.



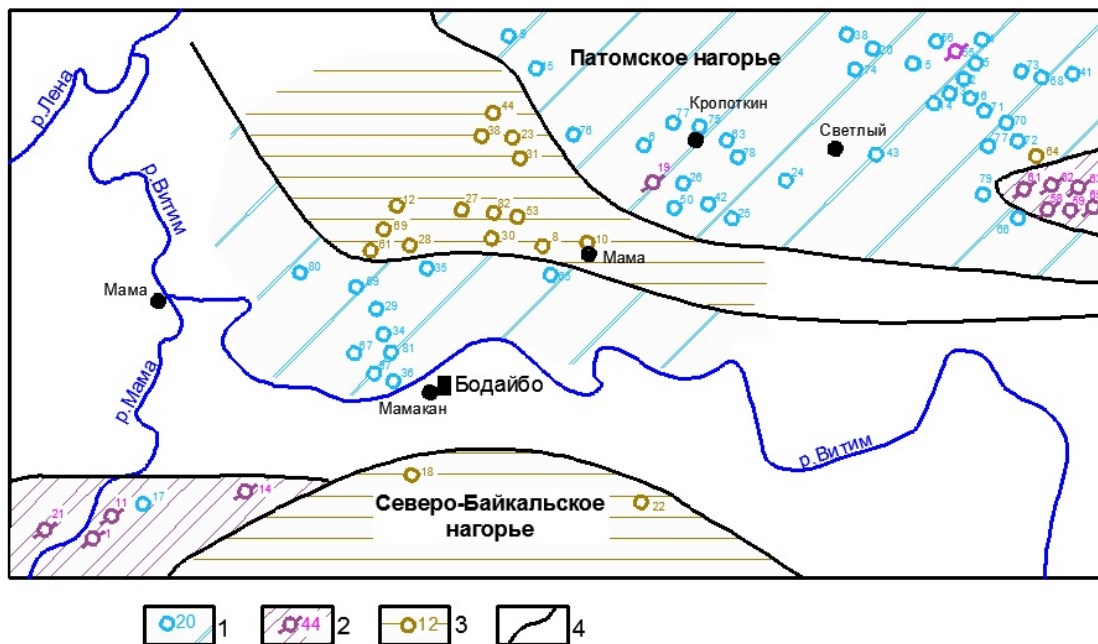
**Рис. 2.** Структурно-гидрогеологическая схема района Коршуновского железорудного месторождения (масштаб: 1:150000) [3]: 1 – гидрогеологические бассейны, интенсивность крапа характеризует степень водопроницаемости горных пород (максимальную в приосевых частях и минимальную на крыльях структур); 2 – кольцевые гидрогеологические массивы; 3, 4 – зоны разломов: 3 – обводненных, 4 – экранирующих; 5 – коэффициенты водопроводимости, м<sup>2</sup>/сут.; 6 – границы зон различной проводимости; 7 – точки наблюдения – эталоны (гидрогеологические скважины); 8, 9 – оси брахиформных структур: 8 – антиклинальных, 9 – синклинальных

**Fig. 2.** Structural-hydrogeological diagram of the Korshunovskoye iron ore deposit area (map scale 1:150000) [3]: 1 – hydrogeological basins, speckle intensity characterizes water permeability degree of rocks (maximum degree in near-axial parts and minimum on structure flanks); 2 – ring hydrogeological massifs; 3, 4 – fault zones: 3 – flooded, 4 – screening; 5 – permeability coefficients, m<sup>2</sup>/day; 6 – boundaries of variable permeability zones; 7 – reference observation points (hydrogeological wells); 8, 9 – axes of brachiform structures: 8 – anticlinal, 9 – synclinal

Следующим примером эффективного применения системно-модельного анализа в гидрогеологии может служить типизация россыпных месторождений Ленского золоторудного района, находящихся на площади Бодайбинского синклинория (рис. 3). Практически все объекты приурочены к поверхностным водотокам различного порядка, входящими в речную сеть р. Витим. Рудовмещающими породами являются песчано-гравийно-галечные четвертичные отложения, перекрывающие коренные породы архейско-протерозойского возраста. Осложняет гидрогеологическую обстановку наличие многолетнемерзлых пород, объем которых на различных участках колеблется от 15 до 70 %. Основную роль в обводнении месторож-

дений играют порово-пластовые воды четвертичных отложений. Однако, поскольку россыпи приурочены к руслам водотоков, а последние, как правило, заложены по тектонически нарушенным зонам, часто наблюдается дополнительный приток трещинно-жильных вод из обводненных разломов по подрусловым таликам. Эти и ряд других факторов обусловили значительное разнообразие мерзлотно-гидрогеологических условий золоторудных месторождений, что и привело к необходимости применения системно-модельного анализа при определении сложности условий с целью оптимизации объемов инженерно-гидрогеологических работ, направленных на оценку обводненности исследуемых объектов [3, 17].





**Рис. 3.** Схема районирования месторождений Ленского золоторудного района по сложности инженерно-гидрогеологических условий [3] (масштаб: 2000000): 1 – месторождения первой группы сложности; 2 – месторождения второй группы сложности; 3 – месторождения третьей группы сложности (цифра – модельный номер россыпи: 1. Малый Патом (верх), 2. Малый Патом (низ), 3. Большой Баллаганах, 4. Всилевский, 5. Павловский, 7. Нирокам, 8. Камустяг, 9. Большой Иллигирь, 10. Большой Макалак, 11. Тесса, 12. Лев. Накатами, 13. Бол. Бижухта, 14. Додыхта (Мамакан), 15. Кевакта, Большая Безымянка, 16. Крещенский, 17. Каверга, 18. Икибзяк (низ), 19. Угахан (низ), 20. Бол. Таймендра, 21. Монокан, 22. Чаянгро, 23. Маракан, 24. Кадаликан, 25. Вача (среднее течение), 26. Бол. Безымянка (Ныгра), 27. Большой Догалдын, 28. Акамак-Накатами, 29. Каменский (дражный полигон), 30. Тактыкан-Берикан, 31. Веселяевский, 32. Большой Патом (дражный полигон), 33. Горбылях (низ), 85. Горбылях (верх)); 4 – условные границы между районами с различной сложностью инженерно-гидрогеологических условий

**Fig. 3.** Zoning diagram of Lena gold ore region fields according to the complexity of engineering and hydrogeological conditions [3] (map scale: 1:2000000): 1 – first group complexity deposits; 2 – second group complexity deposits; 3 – third group complexity deposits (figure – model number of the object: 1. Small Patom (top), 2. Small Patom (bottom), 3. Bolshoy Ballagnach, 4. Vsilevsky, 5. Pavlovsky, 7. Nirokam, 8. Kamustyag, 9. Bolshoy Illigir, 10. Bolshoy Makalak, 11. Tessa, 12. Leo Nakatami, 13. Bolshaya Bizhuihta, 14. Dodykhta (Mamakan), 15. Kevakta, Bolshaya Bezmyanka, 16. Kreshchensky, 17. Kaverga, 18. Ikiabyak (bottom), 19. Ugakhan (bottom), 20. Bolshaya Taimendra, 21. Monokan, 22. Chayangro, 23. Marakan, 24. Kadalikan, 25. Vacha (middle reaches), 26. Bolshaya Bezmyanka (Nygra), 27. Bolshoy Dogaldyn, 28. Akamak-Nakatami, 29. Kamensky (dredging range), 30. Takhtykan-Berikan, 31. Veselyaevsky, 32. Bolshoy Patom (dredging range), 33. Gorbilyakh (bottom), 85. Gorbilyakh (top)); 4 – conditional boundaries between the areas with different complexity of engineering and hydrogeological conditions

Суммарное количество россыпей 85, в качестве объектов-эталонов было выбрано 34 россыпи, общий объем проанализированных точек наблюдений (скважин и шурфов) – более 500. Каждая точка охарактеризована 31 признаком, включающим, в частности, геолого-структурное и геоморфологическое положения, глубину залегания россыпи, порядок водотока, к которому она приурочена, теплофизическое состояние рудовмещающих отложений, мощность талой зоны, расстояние до главной и ближней дрен и превышение уровня подземных вод над ними, глубину уровня подземных вод, фильтрационные свойства водовмещающих отложений и ряд других показателей (использован синоним во избежание тафталогии). По завершении этапа обучения были выявлены типоморфные клас-

сификационные признаки и составлена классификационная таблица. В таблице выделено три основных типа месторождений, характеризующихся различной степенью сложности инженерно-гидрогеологических условий.

Месторождения I типа включают россыпи с простыми условиями. Они, как правило, залегают на глубине не более 7 м от поверхности земли, мощность талой зоны не превышает 8 м, подземные воды вскрываются на глубине до 2,5 м и имеют незначительные напоры – от 0 до 3 м, дебиты скважин до 2,5 л/с. Объекты приурочены к руслам водотоков V, VI и более высоких порядков.

Месторождения II типа (инженерно-гидрогеологические условия средней сложности) залегают на глубине от 8 до 15 м, уровень подзем-

ных вод вскрывается на 2,5–10, иногда 15 м, мощность талой зоны составляет 8–15 м, напор подземных вод довольно значителен – 3–10 м, дебиты скважин не превышают 5 л/с. Россыпи приурочены к руслам водотоков IV порядка.

Источниками формирования водопритоков на месторождениях I и II типов являются инфильтрации атмосферных осадков, естественные запасы и естественные ресурсы.

К последнему, III, типу отнесены объекты со сложными условиями. Они залегают на глубине 18 м от поверхности земли и характеризуются мощностью талой зоны свыше 15 м, уровень подземных вод вскрывается на глубине 15 м и более, дебиты скважин не превышают 5 л/с. Подземные воды чаще всего гидравлически взаимосвязаны с поверхностными и, кроме перечисленных выше источников восполнения, имеют еще один – при-

влекаемые ресурсы, а естественные ресурсы представлены не только порово-пластовыми водами четвертичных отложений, но и трещинно-жильными водами обводненных разломов. Эти россыпи приурочены в основном к участкам впадения водотоков IV порядка в реки III порядка.

Фильтрационные характеристики водовмещающих отложений на месторождениях всех типов дифференцируются крайне слабо из-за их литологической однородности.

На этапе обучения выделены также наиболее общие, но достаточно весомые признаки для классификации объектов-аналогов, которыми явились гипсометрическое положение россыпи относительно уреза воды, процент мерзлых отложений, абсолютные отметки земной поверхности, порядок водотоков, к которым приурочены россыпи (табл. 2).

**Таблица 2.** Характеристика месторождений Ленского золоторудного района

**Table 2.** Characteristics of Lena gold ore region fields

| Группа сложности месторождений<br>Complexity degree of deposits | Основные признаки/Main criteria                                                                                             |                                                           |                                                                 |                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                                                                 | Гипсометрическое положение россыпи относительно уреза воды, м<br>Hypsometric placer position relative to the water level, m | Мерзлые аллювиальные породы, %<br>Frozen alluvial rock, % | Абсолютные отметки поверхности, м<br>Surface elevation marks, m | Порядок водотока<br>River taxonomic level                                |
| I                                                               | От положительных величин до 0<br>From positive values up to 0                                                               | Более 30–35<br>More than 30–35                            | 360–580                                                         | V, VI и выше<br>V, VI and upper                                          |
| II                                                              | 0...–15                                                                                                                     | Более 30–35<br>More than 30–35                            | 670–750                                                         | IV порядок<br>IV level                                                   |
| III                                                             | –15...–30                                                                                                                   | Менее 30–35<br>Less than 30–35                            | 580–670                                                         | Приустьевая часть водотоков IV порядка<br>Estuary part of IV level river |

На этапе распознавания, или прогнозирования, проанализированы данные по 51 объекту-аналогу, которые, в свою очередь, отнесены к соответствующим типам месторождений, характеризующихся различной степенью сложности инженерно-гидрогеологических условий (табл. 2).

В результате работы составлена схема типизации месторождений Ленского золоторудного района по сложности инженерно-гидрогеологических условий (рис. 3).

Аналогичная работа, направленная на оптимизацию размещения поисково-разведочных скважин на воду, реализована на *месторождениях углеводородов Чонской группы*, расположенных в пределах Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. В районах Крайнего Севера, отличающихся весьма сложными геолого-гидрогеологическими условиями [16, 18, 19] и весьма низкой степенью изученности, определение местоположения гидрогеологических скважин представляет значительную сложность и часто не приносит желаемого результата [20], что обусловило необходимость выделения

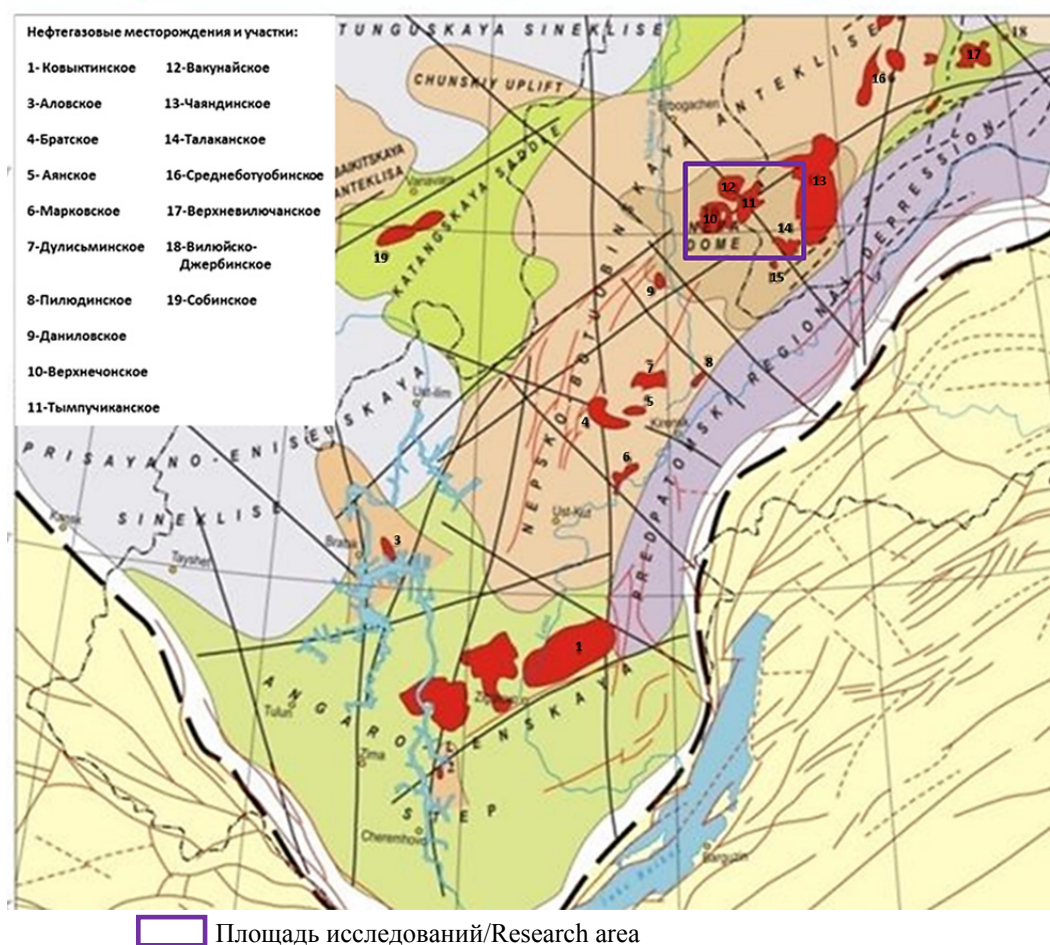
ряда легко определяемых показателей, предопределяющих выбор перспективных для бурения гидрогеологических скважин площадок.

В структурном отношении исследуемая территория приурочена к Непско-Ботуобинской антиклинали, находящейся в Центральной части Непского свода (рис. 4).

В процессе анализа информации выявлено разломно-блоковое строение территории, осложненной разломами северо-восточного и северо-западного направлений с малоамплитудными по ним смещениями (5–7 м), что весьма характерно для Восточной Сибири в целом [19]. В геологическом строении исследуемой площади принимают участие образования архея, протерозоя, кембрийской системы, четвертичные отложения, а также триасовые интрузивные образования.

Формирование подземных вод в пределах палеозойских и мезозойских отложений контролируется разломной тектоникой, трапповым магматизмом и особенностями распространения многолетнемерзлых пород.





**Рис. 4.** Структурно-тектоническая схема района расположения основных месторождений нефти и газа Восточной Сибири [20, 21]

**Fig. 4.** Structural-tectonic diagram of the location area of the major oil and gas fields in Eastern Siberia [20, 21]

В силу слабой изученности выделение зон повышенной водообильности для последующего бурения по прямым гидрогеологическим признакам практически невозможно. В связи с этим разработан принцип оптимизации поисково-разведочного бурения на базе оценки комплексного показателя водообильности с применением системно-модельного анализа, определение которого производится по косвенным признакам методом экспертных оценок [12, 22, 23].

В качестве эталонных объектов рассматривались участки водозаборных скважин на наиболее полно изученных в геолого-гидрогеологическом отношении нефтегазоконденсатных месторождениях (НГКМ: Верхнечонское, Чаяндинское). Была сформирована база данных, состоящая из более чем 50 факторов-предикторов. Анализ базы данных и результаты проведенных полевых работ на НГКМ Восточной Сибири позволили выделить ряд косвенных показателей и факторов, в наибольшей степени влияющих на водообильность перспективных подразделений и не представляющих собой слож-

ности при их определении, что и явилось завершением обучающего этапа:

1. Геологическое строение территории, отраженное на государственных картах масштаба 1:200000.
2. Модуль трещиноватости  $M_T$ , определенный по соотношению длины русел рек  $l$ , не перекрытых четвертичными отложениями и пересекающих площадь квадрата  $S$ , размер которого определяется детальностью исследований:

$$M_T = l/S,$$

а также составленная в соответствии с расчетами схема модулей трещиноватости территории.

3. Линейный и площадной модули подземного стока  $M_L$  и  $M_P$ , определенные по результатам полевых работ балансово-гидрометрическим методом, то есть по разности расхода рек в двух гидрометрических створах  $Q$  [4].

Площадные модули естественных ресурсов подземных вод  $M_P$  определяются для всего водосборного бассейна реки, ограниченного замыкающим створом:

$$M_{\text{п}} = Q/S_{\text{в}},$$

где  $Q$  – расход воды, приведенный к 95 % обеспеченности, л/с;  $S_{\text{в}}$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>.

Линейные модули подземного стока  $M_{\text{л}}$  определяются следующим образом:

$$M_{\text{л}} = \Delta Q / \Delta L,$$

где  $\Delta Q$  – приращение расхода реки между створами, л/с;  $\Delta L$  – расстояние между створами, км.

4. Аквальные и морфоскульптурные показатели: превышение и расстояние точек наблюдения над главной и ближней дренами, угол уклона рельефа, индекс пересеченности рельефа [23].

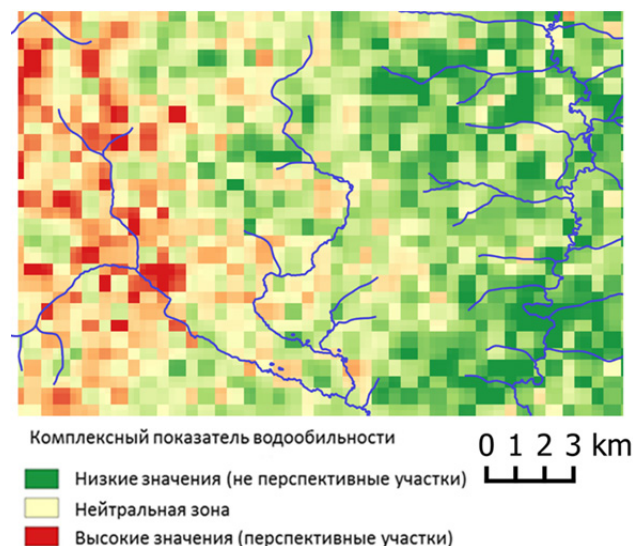
В результате в соответствии с рассчитанным комплексным показателем водообильности выделены наиболее перспективные для бурения разведочных скважин участки (рис. 5), что позволило сократить первоначально намеченный объем бурения почти на 30 % [12, 13, 17].

На этапе распознавания производилась количественная дифференциация и последующее комплексирование перечисленных показателей на месторождениях-аналогах (Тымпучиканское, Игнялинское и прочие НГКМ), позволившие оценить исследуемые площади по их водохозяйственной перспективности и оптимизировать проведение геофизических, буровых и опытно-фильтрационных работ на выделенных участках.

## Заключение

Рассмотренные примеры системно-модельного анализа гидрогеологической обстановки на месторождениях полезных ископаемых позволяют рекомендовать его к широкому внедрению в практику гидрогеологических исследований как в плане оптимизации видов и объемов специальных гидрогеологических исследований на месторождениях (россыпи Ленского золоторудного района, НГКМ Чонской группы), так и при разномасштабном структурно-гидрогеологическом районировании, при планировании расположения водопонижающих установок и оценке наиболее водообильных зон для целей осушения горных выработок и водо-

снабжения (железрудные месторождения Коршуновское, Рудногорское, Капаевское; Зазинское месторождение подземных вод).



**Рис. 5.** Картографическое представление расчетного комплексного показателя водообильности в пределах территории Тымпучиканского нефтегазоконденсатного месторождения (фрагмент) [13]

**Fig. 5.** Core mapping of the calculated complex indicator of water abundance within the Tympuchikanskoe oil and gas condensate field (a fragment) [13]

Кроме того, метод системно-модельного анализа с учетом введения дополнительных способов обработки может найти и уже находит широкое применение при работе с базами данных и типизации объектов по эколого-гидрогеологическим показателям.

Следует отметить, что техническая реализация разработанной методики выполнена на базе открытых геоинформационных технологий в среде QuantumGIS, что значительно повысило экономическую эффективность ее применения. Таким образом, описанная методика может быть реализована средствами любого универсального ГИС-приложения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аликин Э.А. Месторождения подземных вод в рамках системного подхода // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 3. – С. 46–48.
2. Айвазян С.А., Бежаева З.И., Староверов О.В. Классификация многомерных наблюдений. – М.: Статистика, 1974. – 240 с.
3. Аузина Л.И. Опыт применения системно-модельного анализа в гидрогеологии // Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых: сб. науч. тр. – Иркутск: Изд-во ИПИ, 1990. – С. 138–145.
4. Аликин Э.А. Оптимизация методологии поисково-разведочных работ на подземные воды // Вестник Пермского университета. Геология. – 2011. – № 1. – С. 18–25.
5. Gorban A.N., Zinovyev A.Y. Principal graphs and manifolds (chapter 2) // Handbook of research on machine learning applications and trends: algorithms, methods, and techniques / eds. E.S. Olivas, J.D.M. Guerrero, M.M. Sober, J.R.M. Benedito, A.J.S. López. – Hershey: IGI Global, 2010. – P. 28–59.
6. Akinduko A.A., Mirkes E.M., Gorban A.N. SOM: Stochastic initialization versus principal components // Information Sciences. – 2016. – Vol. 364–365. – P. 213–221. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.10.013> (дата обращения 28.04.2023).

7. Burges C.J.C. A Tutorial on support vector machines for pattern recognition // *Data Mining and Knowledge Discovery*. – 1998. – Vol. 2. – P. 121–167. URL: <https://doi.org/10.1023/A:1009715923555> (дата обращения 28.04.2023).
8. Bateman R.M. Openhole log analysis and formation evaluation. – Society of Petroleum Engineers, 2012. – 668 p. DOI: 10.2118/9781613991565
9. Jöreskog K.G., Klován J.E., Reymont R.A. Geological factor analysis. – Amsterdam: Elsevier, 1976. – 260 p.
10. Fisher R.A. Statistical methods for research workers. – New York: Halner Publ. Co., 1970. – 362 p.
11. Haan C.T. Statistical methods in hydrology. – Ames: Iowa State University Press, 1977. – 378 p.
12. Геоинформационный подход к оценке ресурсной перспективности площадей (на примере месторождений подземных вод Восточной Сибири) / А.В. Паршин, Л.И. Аузина, С.Н. Просекин, А.В. Блинов, А.Н. Костерев, Г.С. Лоншаков, А.М. Усманова, С.А. Шестаков, Ю.А. Давыденко // *Геоинформатика*. – 2017. – № 1. – С. 11–20.
13. Аузина Л.И. Один из подходов к оптимизации поисково-оценочных работ на воду на месторождениях нефтегазового комплекса Восточной Сибири // *Известия Сибирского отделения секции наук о земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. – 2014. – № 6. – С. 82–88.
14. Кургузов К.В., Фоменко И.К., Сироткина О.Н. Вероятностно-статистические подходы при оценке неопределенности литотехнических систем // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология*. – 2020. – № 2. – С. 80–89. – URL: <https://doi.org/10.31857/S0869780920020071> (дата обращения 28.04.2023).
15. Dutova E., Nikitenkov A., Kuzevanov K. The HydroGeo software package and its usage // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – Vol. 98. – Article number 04005. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199804005> (дата обращения 28.04.2023).
16. Shiki T. Reading of the trigger records of sedimentary events – a problem for future studies // *Sedimentary Geology*. – 1996. – Vol. 104. – № 1–4. – P. 249–255. URL: [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(95\)00132-8](https://doi.org/10.1016/0037-0738(95)00132-8) (дата обращения 28.04.2023).
17. Аузина Л.И., Ланкин Ю.К. Особенности проведения опытно-фильтрационных исследований в районах развития пластов с двойной пористостью // *Науки о Земле и недропользование*. – 2021. – Т. 44. – № 2. – С. 116–124. URL: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-116-124> (дата обращения 28.04.2023).
18. Прогноз развития экзогенных геологических процессов по территории Российской Федерации. 2022 год. – М., 2021. – 84 с. URL: <http://geomonitoring.ru/download/EGP/prognoz/2022.pdf> (дата обращения 03.04.2023).
19. Коробова И.В., Макеев В.М. Оценка неотектонических движений в центральной части Восточно-Европейской платформы // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология*. – 2021. – № 6. – С. 17–27. URL: <https://doi.org/10.31857/S0869780921060047> (дата обращения 28.04.2023).
20. Самсонов В.В., Ларичев А.И. Перспективные нефтегазоносные комплексы и зоны южной части Сибирской платформы // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. – 2008. – Т. 3. – № 4. URL: [http://www.ngtp.ru/rub/4/43\\_2008.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/4/43_2008.pdf) (дата обращения 03.04.2023).
21. Харитонов А.Л. Нефтегазоносность морфоструктур центрального типа на территории Восточной Сибири // *Деловой журнал Neftegaz.RU*. – 2019. – № 10 (94). – С. 106–112.
22. Budyak A., Parshin A. GIS mapping of geological features of the Baikal mountain region based on integrated geochemical indicators // *Goldschmidt 2013 Conference Abstracts. Mineralogical Magazine*. – 2013. – Vol. 77. – № 5. – P. 788. URL: <https://goldschmidtabstracts.info/abstracts/abstractView?id=2013004112> (дата обращения 03.04.2023).
23. Riley S.J., DeGloria S.D., Elliot R. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity // *Intermountain Journal of Sciences*. – 1999. – Vol. 5. – № 1–4. – P. 23–27.

## Информация об авторах

**Лариса Ивановна Аузина**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. [auzina@istu.edu](mailto:auzina@istu.edu); <http://orcid.org/0000-0002-4702-786>.

Поступила в редакцию: 12.05.2023

Поступила после рецензирования: 24.05.2023

Принята к публикации: 13.12.2023

## REFERENCES

1. Alikin E.A. Underground water deposits in the framework of system approach. *Prospect and protection of mineral resources*, 2008, no. 3, pp. 46–48. (In Russ.)
2. Ayvazyan S.A., Bezhaeva Z.I., Staroverov O.V. *Classification of multivariate observations*. Moscow, Statistika Publ., 1974. 240 p. (In Russ.)
3. Auzina L.I. Experience in the application of system-model analysis in hydrogeology. *Geology, prospecting and exploration of deposits of ore minerals: collection of scientific papers*. Irkutsk, IPI Publ., 1990. pp. 138–145. (In Russ.)
4. Alikin E.A. Optimization of search methodology and exploration works on underground waters. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2011, no. 1, pp. 18–25. (In Russ.)
5. Gorban A.N., Zinovyev A.Y. Principal graphs and manifolds (chapter 2). *Handbook of research on machine learning applications and trends: algorithms, methods, and techniques*. Eds. E.S. Olivas, J.D.M. Guerrero, M.M. Sober, J.R.M. Bedito, A.J.S. López. Hershey, IGI Global, 2010. pp. 28–59.
6. Akinduko A.A., Mirkes E.M., Gorban A.N. SOM: Stochastic initialization versus principal components. *Information Sciences*, 2016, vol. 364–365, pp. 213–221. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.10.013> (accessed 28 April 2023).
7. Burges C.J.C. A Tutorial on support vector machines for pattern recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 1998, vol. 2, pp. 121–167. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1009715923555> (accessed 28 April 2023).

8. Bateman R.M. *Openhole log analysis and formation evaluation*. Society of Petroleum Engineers, 2012. 668 p. DOI: 10.2118/9781613991565
9. Jöreskog K.G., Klován J.E., Reymont R.A. *Geological factor analysis*. Amsterdam, Elsevier, 1976. 260 p.
10. Fisher R.A. *Statistical methods for research workers*. New York, Halner Publ. Co., 1970. 362 p.
11. Haan C.T. *Statistical methods in hydrology*. Ames, Iowa State University Press, 1977. 378 p.
12. Parshin A.V., Auzina L.I., Prosekin S.N., Blinov A.V., Kosterev A.N., Lonshakov Gr.S., Usmanova A.M., Shestakov S.A., Davydenko Yu.A. GIS-based approach to estimating area prospects for mineral deposits (on example of groundwater deposits of Eastern Siberia territory). *Geoinformatika*, 2017, no. 1, pp. 11–20. (In Russ.)
13. Auzina L.I. An approach to groundwater exploration optimization at oil and gas fields of Eastern Siberia. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*, 2014, no. 6, pp. 82–88. (In Russ.)
14. Kurguzov K.V., Fomenko I.K., Sirotkina O.N. Probabilistic and statistical approaches to uncertainty assessment in lithotechnogenic systems. *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2020, no. 2, pp. 80–89. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.31857/S0869780920020071> (accessed 28 April 2023).
15. Dutova E., Nikitenkov A., Kuzevanov K. The HydroGeo software package and its usage. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, article number 04005. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199804005> (accessed 28 April 2023).
16. Shiki T. Reading of the trigger records of sedimentary events – a problem for future studies. *Sedimentary Geology*, 1996, vol. 104, no. 1–4, pp. 249–255. Available at: [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(95\)00132-8](https://doi.org/10.1016/0037-0738(95)00132-8) (accessed 28 April 2023).
17. Auzina L.I., Lankin Yu.K. Features of ground inflow testing in the areas of double porosity aquifer development. *Earth sciences and subsoil use*, 2021, vol. 44, no. 2, pp. 116–124. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-116-124> (accessed 28 April 2023).
18. *Forecast of the development of exogenous geological processes on the territory of the Russian Federation*. 2022. Moscow, 2021. 84 p. (In Russ.) Available at: <http://geomonitoring.ru/download/EGP/prognoz/2022.pdf> (accessed: 3 April 2023).
19. Korobova I.V., Makeev V.M. Assessment of neotectonic movements in the central part of the eastern European platform. *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2021, no. 6, pp. 17–27. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.31857/S0869780921060047> (accessed 28 April 2023).
20. Samsonov V.V., Larichev A.I. Perspective oil-gas complexes of southern Siberian platform. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika (RUS)*, 2008, vol. 3, no. 4. (In Russ.) Available at: [http://www.ngtp.ru/rub/4/43\\_2008.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/4/43_2008.pdf) (accessed: 3 April 2023).
21. Kharitonov A.L. Oil and gas potential of morphostructures of the central type in the territory of Eastern Siberia. *Business magazine Neftegaz.RU*, 2019, no. 10 (94), pp. 106–112. (In Russ.)
22. Budyak A., Parshin A. GIS mapping of geological features of the Baikal mountain region based on integrated geochemical indicators. *Goldschmidt 2013 Conference Abstracts. Mineralogical Magazine*, 2013, vol. 77, no. 5, pp. 788. Available at: <https://goldschmidtabstracts.info/abstracts/abstractView?id=2013004112> (accessed: 3 April 2023).
23. Riley S.J., DeGloria S.D., Elliot R. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences*, 1999, vol. 5, no. 1–4, pp. 23–27.

#### Information about the authors

**Larisa I. Auzina**, Cand. Sc., Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. [auzina@istu.edu](mailto:auzina@istu.edu); <http://orcid.org/0000-0002-4702-786>.

Received: 12.05.2023

Revised: 24.05.2023

Accepted: 13.12.2023