

УДК 004.65:556.3

© Коллектив авторов

*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*

# ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ РЕСУРСНОЙ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ПЛОЩАДЕЙ (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ)

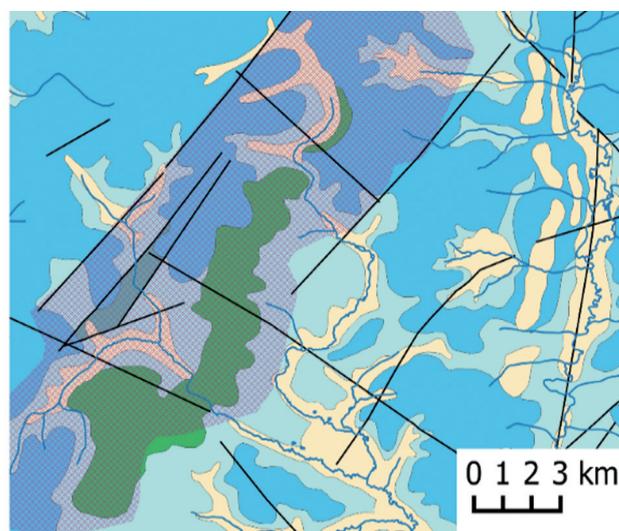
Геоинформационные системы

## Введение

Современная ситуация в геологической отрасли требует сокращения сроков выполнения геологоразведочных работ и уменьшения их стоимости, что предполагает разработку способов оптимизации вложений в поисково-оценочные и разведочные работы различного профиля. Известно, что наиболее затратной статьёй при геологических поисках является бурение, что определяет целесообразность оптимизации именно этого вида работ. В связи со спецификой поисков и оценки ресурсов различных видов полезных ископаемых, данная проблема особенно актуальна по отношению к поискам месторождений подземных вод и углеводородного сырья.

Многие объекты нефтегазового комплекса Восточной Сибири испытывают дефицит подземных вод для разноцелевого водоснабжения. Сложные геолого-гидрогеологические условия и слабая изученность перспективных на нефть территорий Восточной Сибири делают неэффективным прогнозирование рационального местоположения поисково-разведочных скважин по прямым гидрогеологическим признакам. К примеру, на рис. 1 представлен фрагмент кондиционной геологической карты, отражающей наличие небольшого участка трапповой интрузии, являющейся значимым с позиции гидрогеологического бурения фактором. Однако после анализа геофизических данных очевидно, что она имеет намного больший размер, что в при традиционном подходе к навигации бурения может привести к потере финансовых средств.

Из-за сложности обоснованного заложения поисково-разведочных скважин и в связи со сжатыми сроками работ, местоположение скважин зачастую недостаточно обосновано, что приводит к неудовлетворительному результату. Актуальным является формирование решения, обеспечивающего выделение наиболее перспективных на воду участков и применимого начиная с самых ранних стадий



**Intrusion of traprock ( $\beta$  T1)**  
■ According to the official geological map  
 According to geophysical data and drilling

Рис. 1. Трапповая интрузия по данным кондиционной карты и аэрогеофизики

поисково-оценочных работ или даже при разработке проектной документации. Очевидно, что такая система должна требовать минимального количества полевых данных за счет максимального использования априорной или оперативно получаемой информации: сведений из архивных и литературных источников, данных дистанционного зондирования Земли. При этом возможность оценки перспектив площади на основании используемых данных должна быть научно обоснованной.

В настоящее время на первых этапах поисково-оценочных работ производится сбор и предполевого анализ архивной информации, однако картографические материалы, которые формируются на этой стадии, далеко не в полной мере используются для получения синтезированной

прогнозной информации, а применяются в основном для создания картографического обеспечения геологоразведочных работ.

Предметом описанного в данной статье исследования является создание геоинформационной технологии для ранжирования территории по степени перспективности на подземные воды, адекватной региональной обстановке и позволяющей оптимизировать размещение гидрогеологических скважин на основе информации, доступной на предполевых этапах ГРР. Данная технология применима при разработке проектов поисково-оценочных и разведочных геологических работ, непосредственно в рамках ГРР, а также при решении других задач, связанных с оценкой водообильности гидрогеологических подразделений на исследуемых территориях.

Разработка технологии производилась в рамках проектных и поисково-разведочных работ на нефтегазоконденсатных месторождениях (НГКМ)

Чонской группы (Восточная Сибирь), находящихся в крайне сложных геолого-структурных и мерзлотно-гидрогеологических условиях.

Важнейшим результатом многоэтапного тектонического развития территории явилось условно «двухярусное» строение разреза: верхний ярус ограничен ниже- среднекембрийскими отложениями, далее – залегают образования нижнего яруса, включающие соленосные отложения нижнего кембрия, которые способствовали переформированию структуры вышележащей части разреза за счет проявления соляной тектоники в процессе тектонического развития территории, в связи с чем структурные планы подсолевых и надсолевых формаций в значительной степени отличаются друг от друга.

Большая часть нефтегазовых месторождений данного района приурочена к одной из крупнейших структур нижней подсолевой формации – Непско-Ботубинской гемиантеклизе (рис. 2), в пределах

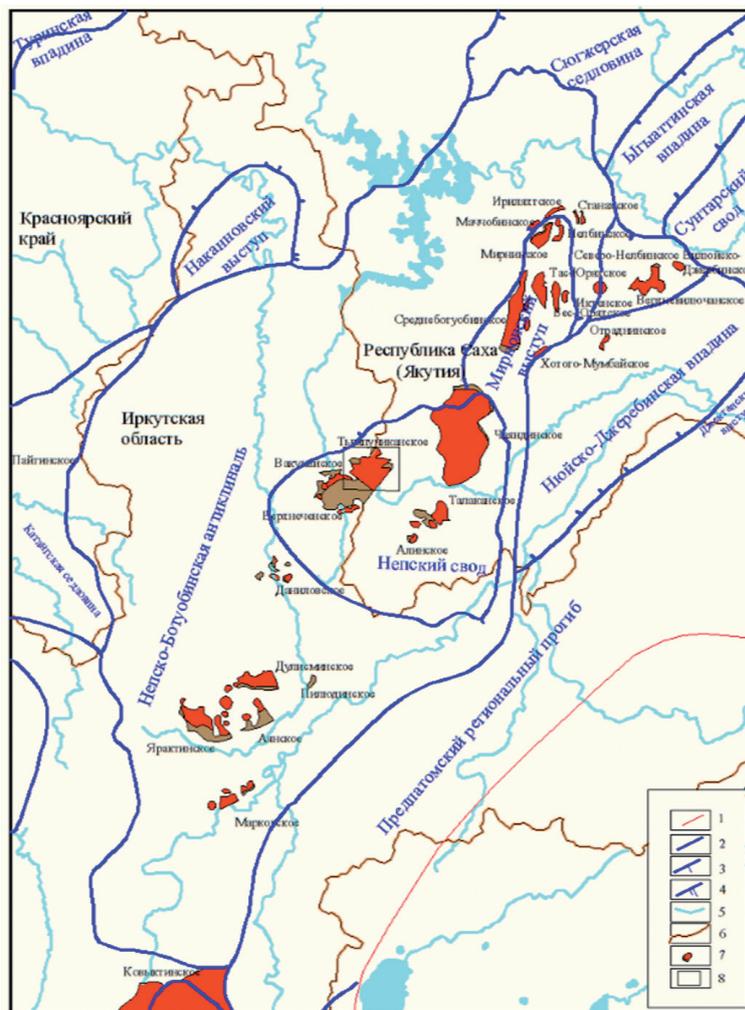


Рис. 2. Структурно-тектоническая схема района работ (Скопенко и др., 2011).

- 1 – граница платформы; 2 – границы надпорядковых тектонических структур; 3 – границы тектонических структур второго порядка; 4 – границы тектонических структур первого порядка; 5 – гидросеть;
- 6 – административные границы областей; 7 – месторождения нефти и газа; 8 – район исследований

которой в результате нескольких стадий тектогенеза сформировалось многоблоковое строение, обусловленное разновозрастными разломами северо-восточного, северо-западного и субмеридионального направлений.

Непско-Ботуобинская гемиантекклиза осложнена тремя положительными структурами I порядка – Непским мегасводом, Мирнинским и Собинско-Аявинским мегавыступами.

Непский мегасвод занимает площадь около 37 000 км<sup>2</sup>, располагается в центральной части гемиантекклизы. Его граница осложнена разломами. Амплитуда мегасвода превышает 500 м, наивысшие отметки составляют менее 700 м. Мегасвод осложнен двумя структурами II порядка. Одна из них – Пеледуйский выступ, на юго-востоке ограниченный разломом, являющимся одновременно границей Непско-Ботуобинской гемиантекклизы и Предпатомского регионального прогиба. Разломами смещена граница выступа и на других участках; внутренняя часть структуры тоже интенсивно нарушена. Вторая крупная положительная структура II порядка – Верхнечонский выступ, имеющий форму равностороннего треугольника. Его амплитуда превышает 150 м, а территория интенсивно нарушена разломами.

С северо-востока к Непскому мегасводу примыкает Мирнинский мегавыступ, ограниченный мощными зонами разломов на западе и юго-востоке. Вся территория мегавыступа интенсивно нарушена дизъюнктивными дислокациями, его амплитуда превышает 300 м.

В центральной части Мирнинского мегавыступа выделяется Таас-Юряхский выступ. На востоке и западе он ограничен разрывными нарушениями. Амплитуда выступа превышает 100 м, площадь составляет около 2 500 км<sup>2</sup>, он осложнен пятью локальными поднятиями. Северная часть Мирнинского мегавыступа приподнята и нарушена системой горстов и грабенов.

Структура верхнего яруса еще более сложна и обусловлена преимущественно проявлениями неотектоники. Разломы северо-восточного и северо-западного направлений обусловили блоковое строение исследуемых площадей. Существенные деформации связаны с внедрением трапповых тел в раннетриасовый период магматизма.

Верхний ярус наиболее перспективен с точки зрения разноцелевого водоснабжения и является основным объектом данных исследований.

В геологическом строении территории принимают участие образования палеозоя, отложения мезозоя и кайнозоя, а также триасовые интрузии. Особенности строения средне-верхнекембрийских

образований (сильная загипсованность нижней части разреза, обусловившая резкое снижение проницаемости) предопределили возможность выделения в разрезе зон с различным характером водообмена: свободного, ограниченного подошвой средне-верхнекембрийских отложений, и затрудненного, приуроченного к ниже-среднекембрийским породам.

Проявления неотектоники отразились в современной орографической структуре, при этом наиболее крупные реки (Чона, Тымпучикан) заложены по мощным зонам тектонических нарушений, более мелкие водотоки – по разломам низших тасономических уровней.

Значительную роль в формировании и распределении подземных вод в регионе играют особенности распространения многолетнемерзлых пород. Их пространственное распространение представляет достаточно сложную картину и не имеет строгой приуроченности к определенным элементам рельефа.

В совокупности такое разнообразие природных условий предопределило крайнюю сложность предполевой оценки гидрогеологических условий исследуемых площадей, в связи с чем первой задачей являлось обоснованное выявление косвенных признаков водообильности, которые можно было бы определить на предполевых стадиях исследований, для чего был использован как математический, так и экспертный подходы. Кроме этого, последовательно решались следующие задачи: получение необходимого набора геоданных; расчет новых производных от первичной картографической информации; выделение и обоснование показателей, связанных с водообильностью; разработка наиболее информативного и легко интерпретируемого способа представления полученных результатов. Перечисленные позиции обеспечиваются описанной далее методикой обработки геоданных.

### Методика обработки и анализа данных

Основные этапы разработки методики производились в рамках поисково-оценочных работ на одном из месторождений, расположенном в пределах Непского мегасвода (в дальнейшем – лицензионный участок N). На первом этапе была выполнена привязка и векторизация материалов по исследуемому региону – как по непосредственно разведываемому лицензионному участку N, так и по соседним с ним площадям, на которых ранее проводились гидрогеологические работы. Базовыми источниками данных являлись общедоступные геологические (масштаба 1:200 000) и топографические карты (масштаба 1:50 000). Для выполнения дальнейших расчетов

необходима векторизация четырех обязательных слоев: структурно-вещественные комплексы, рельеф, гидросеть, тектоническая схема (рис. 3). В данном случае, в связи с требованиями положения о коммерческой тайне, они приведены для небольшого модельного участка, захватывающего часть разведываемой площади. При первом выполнении описанных расчетов набор слоев признаков был значительно шире. Гидросеть уточнялась с применением актуальных данных дистанционного зондирования Земли.

Учитывая недостаточную изученность геологической обстановки на территории, базовая геологическая и топографическая информация дополнялась за счет применения производных от доступной аэрогеофизической и мультиспектральной съемки. В первую очередь выполнена обработка доступных на большинство районов Восточной Сибири аэрогеофизических данных – магнито-разведки. Из исходного аномального магнитного поля (рис. 4а) было удалено нормальное поле и получена составляющая  $T_a$ . Для отделения магнитных эффектов, вызванных влиянием осадочного чехла платформы выполнена трехмерная инверсия

магнитного поля  $T_a$  с определением составляющих вектора суммарной намагниченности для ячеек аппроксимирующей сетки [6]. С целью определения распределения намагниченности на значительную глубину горизонтальный размер ячеек был принят  $4000 \times 4000$  м, а по вертикали проведено разбиение на два слоя: 0-2000 и глубже 2000 метров. Магнитное поле, создаваемое неоднородностями в диапазоне глубин 2000-9500 м, было принято за региональную составляющую. Путем вычитания данной составляющей из поля  $T_a$  и вычисления по результирующему слою индекса пересеченности (Riley et al., 1998) была сформирована производная, в которой четко выделяются линейные аномалии, вызванные структурно-тектоническими нарушениями (одна из них явно приурочена к разлому СВ простирания – рис. 4б), и площадные аномалии – области повышенной дисперсии магнитного поля, вызванные трапповым магматизмом. В результате последующей классификации с обучением по алгоритму Decision Tree с помощью модуля QGIS DTClassifier [3] получены векторные слои, отражающие скрытые под осадочными отложениями трапповые тела и зоны структурно-тектонических

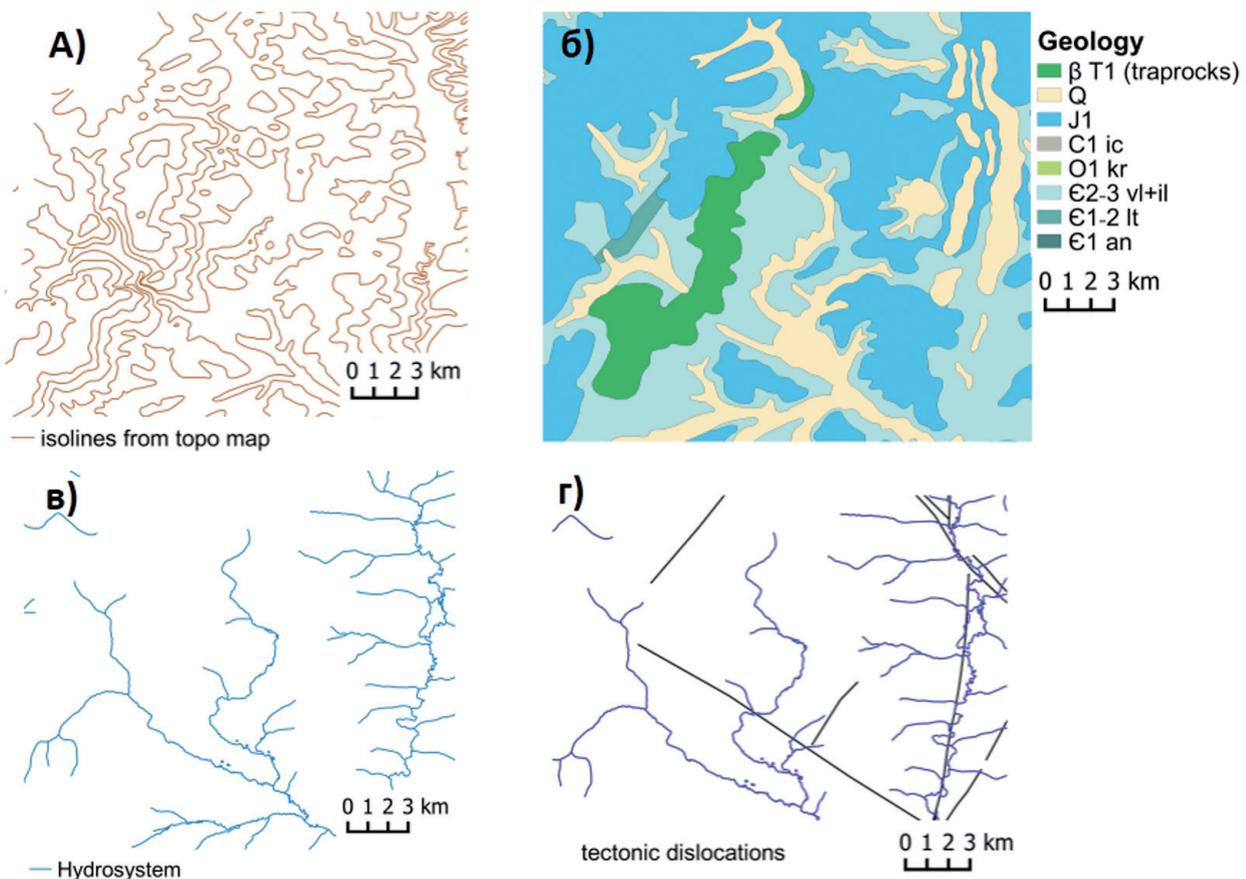


Рис. 3. Базовые слои, необходимые для расчета: изолинии рельефа (а), геологическая карта (б), гидросеть (в), структурно-тектонические нарушения (г)

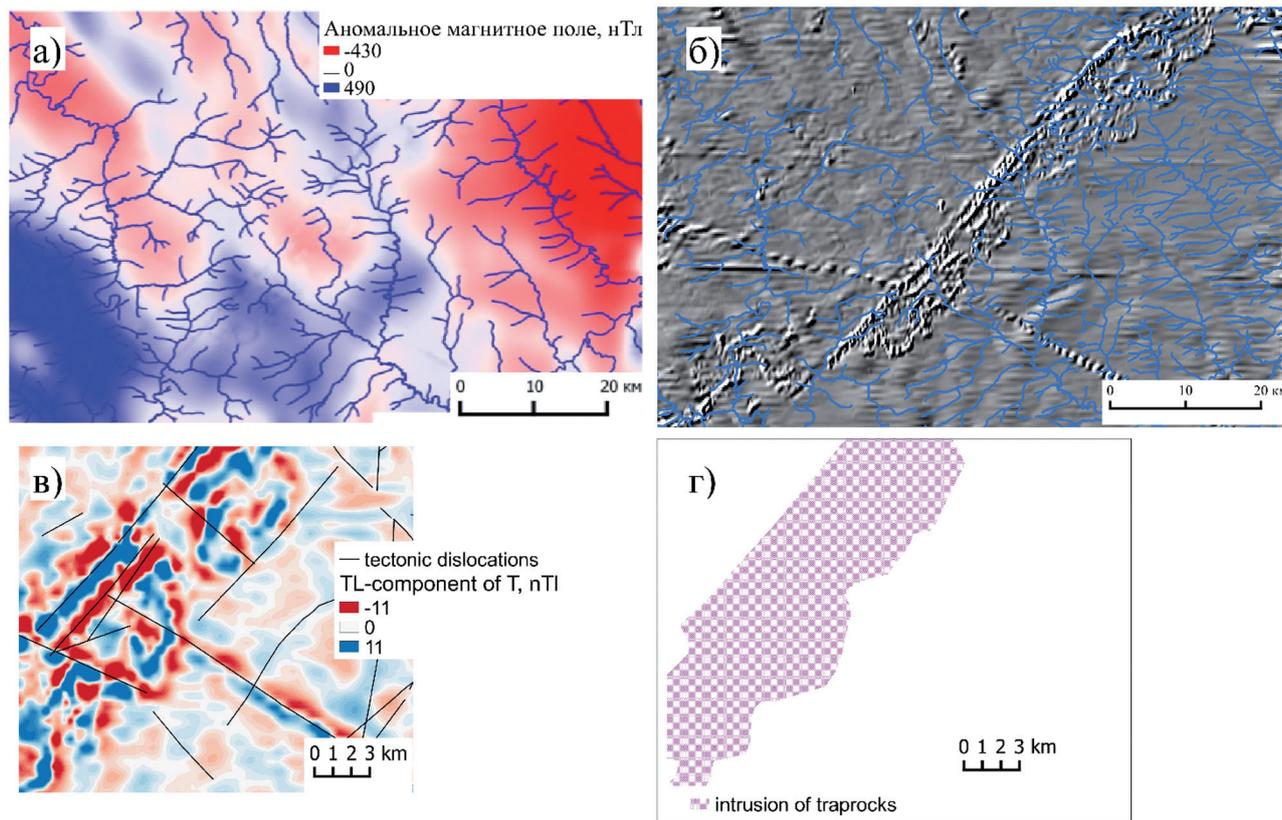


Рис. 4. Исходное поле (а) и производная данных аэромагниторазведки после фильтрации (б) – региональный охват, фрагменты векторных слоев и разрывной тектоники (в) и зоны траппов (г) – для модельного участка

нарушений (фрагменты для модельного участка приведены на рисунке 4в, г).

Выполненные операции позволили существенно уточнить структурно-тектоническую схему, выделить зоны распространения траппового магматизма. На основании полученных результатов тектоническая схема корректировалась с целью определения возможной гидрогеологической роли разломов.

Также было произведено дешифрирование мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли с целью выделения зон развития термокарстовых процессов, родников, уточнения гидросети и т.д. Для этого разведываемая территория исследовалась с помощью вертолета, производилось фотографирование эталонных мест развития значимых геологических процессов и составлялась геотегируемая база данных, что позволило не тратить время на полевое дешифрирование (рис. 5).

Использовались данные Landsat 8 и RapidEye, пространственного разрешения которых в ряде случаев недостаточно для эффективного обнаружения наледей и родников, однако ряд значимых факторов, таких, как термокарстовые просадки, зоны развития траппов и болота, были выделены достаточно надежно, что позволило сформировать несколько дополнительных слоев признаков.

На основе первичного набора геоданных и построенной цифровой модели рельефа осуществлялся расчет избыточного набора дополнительных слоев морфоструктурных и аквальных признаков, которые теоретически могли иметь связь с водообильностью. Ряд признаков выбирался в соответствии со сформировавшимися у авторов представлениями об особенностях формирования гидрогеологических условий региона, в качестве других приняты широко используемые в морфоструктурном и бассейновом анализе показатели, расчет которых современными средствами ГИС хорошо автоматизирован и не представляет сколько-нибудь значимых трудо- и временных затрат.

Примеры некоторых из рассчитанных признаков приведены на рис. 6.

Значимым дополнительным фактором является «модуль трещиноватости» [1], определяемый по максимально детальной гидросети и геологической карте. Модуль рассчитывается как отношение длин водотоков в условном квадрате к его площади (рис. 7). При этом из общей длины вычитаются участки, перекрытые четвертичными отложениями, поскольку характер формирующегося аллювия отражает особенности развития речной долины, определяемые, в свою очередь, режимом водного потока,

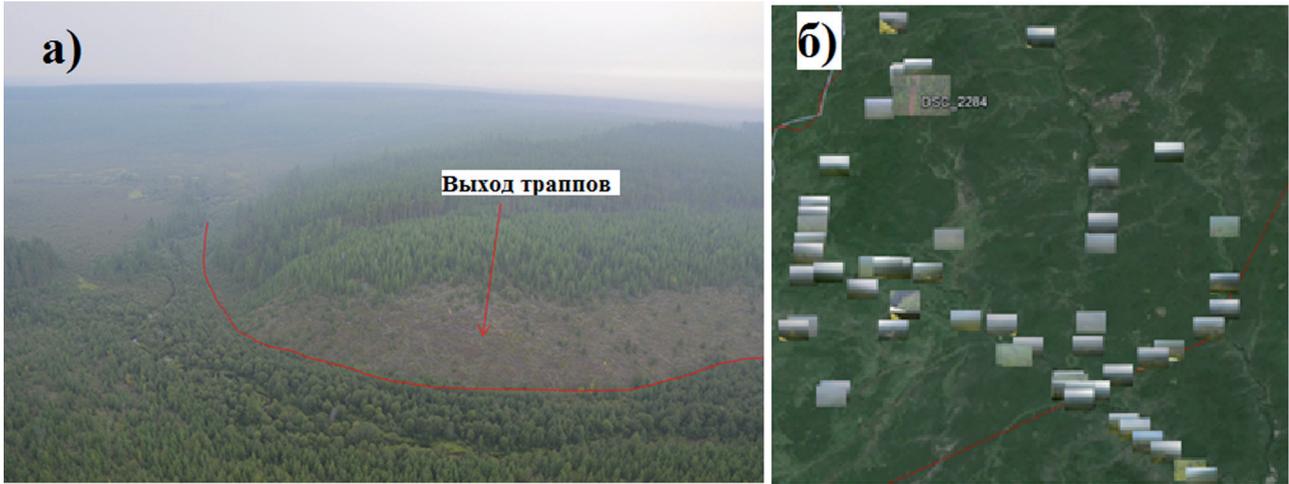


Рис. 5. Эталонный объект (фото с вертолета) (а) и геотегирующая БД фотографий (б)

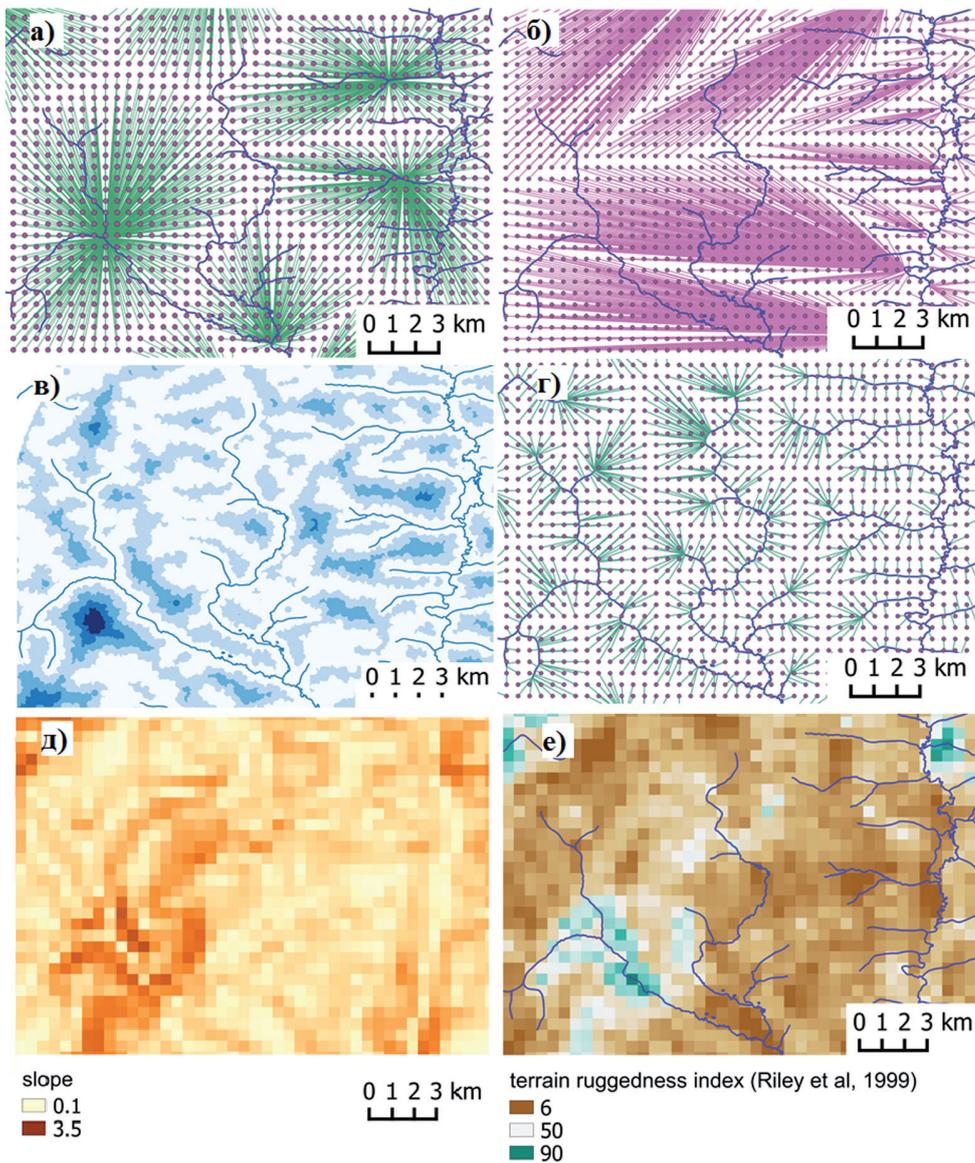


Рис. 6. Примеры некоторых из расчетных слоев аквальных и морфоструктурных производных: близость каждой расчетной точки до пересечения водотоков 3-го и 4-го порядков (а); расстояние до главной дрены (б); расстояние и превышение над ближайшей дреной (в, г); угол уклона рельефа (д); индекс пересеченности рельефа [7] (е)

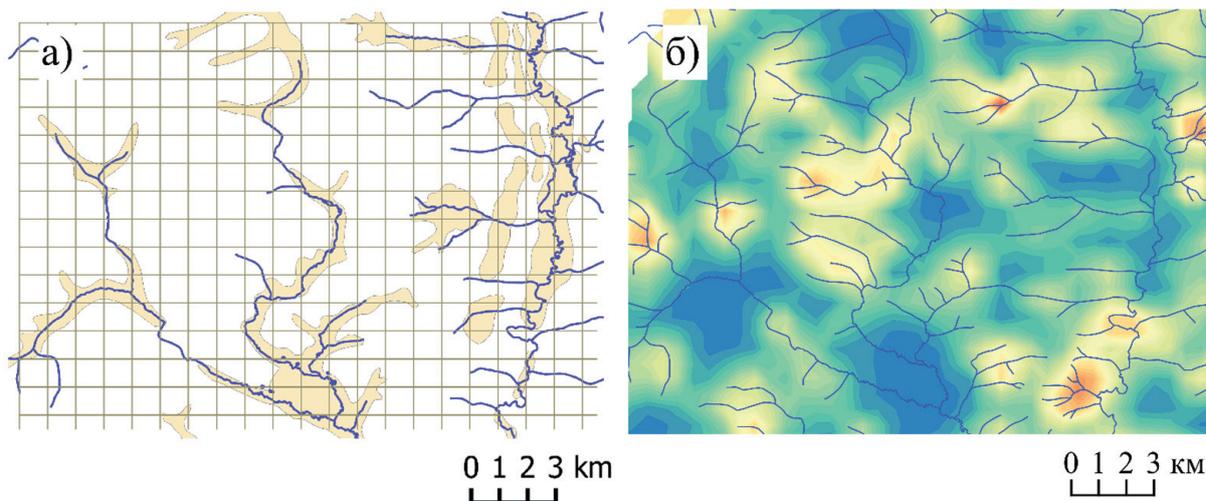


Рис. 7. Принцип расчета (а) и фрагмент картографического представления «модуля трещиноватости» (б) [2]

особенностями движения земной коры, влекущими изменения форм рельефа.

В результате выполненных расчетов был получен набор признаков, насчитывающий около 40 параметров. Значения всех признаков были присвоены узлам сгенерированной регулярной сети с ячейками 200 × 200 метров.

Следующей задачей являлось установление связи ряда показателей с водообильностью. В рассматриваемом регионе на нескольких лицензионных участках ранее проводились гидрогеологические работы (многие из которых не принесли желаемого результата), в результате чего имелись фоновые данные о местоположении гидрогеологических скважин и показателях, полученных при их опробовании (рис. 8).

Для участков расположения этих скважин были получены значения всех признаков, рассчитанных на предыдущей стадии. Расчетные параметры сопоставлялись с гидрогеологическими характеристиками в единой базе данных. Полученный массив данных был подвергнут факторному анализу методом робастных главных компонент (Hubert et al., 2008), который позволил выявить объективную связь водообильности с некоторыми из аквальных и морфоструктурных показателей.

В результате было установлено, что, несмотря на значительные различия в геолого-гидрогеологических и геокриологических условиях даже близких площадей, некоторые характеристики являются достаточно универсальными признаками повышенной водообильности. В число наиболее универсальных в региональном масштабе показателей включены:

- модуль трещиноватости;

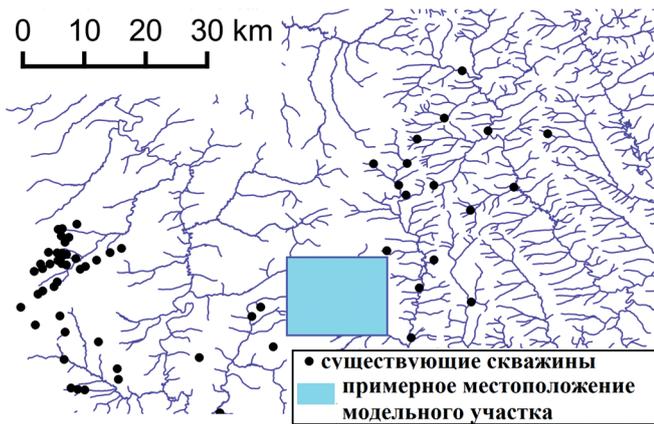
- расстояние до пересечения водотоков 3-го и 4-го порядков;
- превышение расчетной точки над главной и ближней дренами;
- расстояние до ближайшей дрены;
- индекс пересеченности рельефа.

Перечисленные показатели не требуют для расчета ничего, кроме базовых слоев геологических и топографических карт и открытых данных ДЗЗ, то есть для их получения нет необходимости в обработке и интерпретации аэрогеофизических данных. Тем не менее в ряде случаев весьма эффективными оказались «локальные» показатели, которые можно рекомендовать для использования по усмотрению эксперта-гидрогеолога:

- угол уклона рельефа,
- попадание в буфер зон тектонических нарушений определенных типов (требуется определить пороговое значение для каждого разлома),
- попадание в буфер или в саму зону термокарста.

Роль некоторых из дополнительных показателей сложно обосновать математически, поскольку данные RapidEye имелись только на изучаемый участок N, но не на весь регион.

Выделенный набор слоев признаков является довольно компактным, однако с целью еще большего повышения оперативности и наглядности визуальной оценки гидрогеологической обстановки на площади было принято решение о генерализации данного набора до одного интегрального показателя. Безусловно, каждый из рассчитанных слоев может рассматриваться как отдельный признак и картироваться индивидуально. Однако, в том числе



	Наличие ММП	А.о.кровли v, м	интервал V, от- до, м	УПВ, м	Напор, м	Дебит скв, л/с	Понижение, м	Уд.дебит, л/с
410-Г	нет	378	48-100	20.84	27.16	1	39.36	0.030
411-Г	нет	347	45-100	21.58	23.42	10.5	0.8	10.500
413-Г	нет	297	67-120	4	63	1.5	56.53	0.020
415-Г	нет	365	18-100	1.31	16.69	0.27	57.19	0.005
417-Г	нет	377.4	38.6-100	12	26.6	2.2	51.75	0.043
419-Г	нет	372	48-100	7.74	40.26	5.4	4.85	1.100
420-Г	нет	398	39-100	35.6	3.4	11.3	1.83	6.170
421-Г	нет	378	32-100					
422-Г	нет	370	71-100	21.4	49.6	15	1.64	9.150
423-Г	есть	369	51-100	15.43	35.57	14.2	0.88	14.200
424-Г	нет	377	21-100	12	9	10.5	7.65	1.370

Рис. 8. Местоположение гидрогеологических скважин в рассматриваемом регионе и пример их атрибутов

по результатам обсуждения с представителями предприятий геологической отрасли, было принято решение о создании единого картографического представления, характеризующего все имеющиеся взгляды на геологические особенности изучаемой площади. Для этого был применен подход, подобный ранее использованному авторами при решении геохимических задач [4, 5].

Поскольку вклад данных признаков в нагрузки на оси собственных признаков (при факторном анализе) оказался сопоставимым, вес каждого из них в структуре комплексного показателя также принят равным. В первую очередь выполнялось нормирование и классификация слоев значимых признаков. Каждый из слоев приводился в единую размерность путем нормирования на дисперсию и шкалирования либо классификации методом экспертных оценок. В результате слой каждого признака имеет диапазон значений от 0 до 1, где большее значение отражает его положительную гидрогеологическую роль. «Локальные» признаки могут не иметь распространения на всей площади территории. В этом случае признак имеет усиливающее или ослабляющее значение в пределах определенного полигона – либо площади-буфера научно обоснованного размера (например, зона влияния разлома установленной гидрогеологической роли), либо, если объект изначально полигональный, в пределах своей геометрии (трапповая интрузия или зона термокарста).

Все значимые признаки суммируются и результат картируются в условных единицах (рис. 9).

Данный показатель цветом отражает степень перспективности каждой единицы площади для постановки поисково-разведочных работ на воду. Представление предельно просто для интерпрета-

ции – в местах максимальных значений показателя заложение скважин наиболее целесообразно. В зависимости от задачи и имеющегося набора геоданных комплексный показатель может быть рассчитан с разной степенью детальности.

Апробация данной методики поисковым бурением показала ее высокую эффективность – скважины, пробуренные и опробованные на выделенных участках, оказались наиболее водообильными и доказали правомерность предложенного подхода (рис. 10), в то время как на соседнем лицензионном участке бурение скважин, заложенных по традиционному подходу, часто не давало положительного результата.

Техническая реализация разработанной методики выполнена на базе открытых геоинформационных технологий, что значительно повысило экономическую эффективность ее применения. Авторы использовали СУБД PostgreSQL/PostGIS и среды QuantumGIS и GRASS. Автоматизация расчетов и картопостроений позволила авторам в дальнейшем эффективно использовать разработанную технологию для подготовки проектной документации на других лицензионных участках. Описанная методика может быть реализована средствами любого универсального ГИС-приложения.

### Выводы

В результате разработана технология, которая позволяет выявить объективные поисковые признаки и в совокупности с имеющимися представлениями о геолого-гидрогеологических особенностях территорий преобразовать их в легко интерпретируемое изображение, характеризующее геологическую обстановку изучаемой площади с точки зрения решаемых задач.

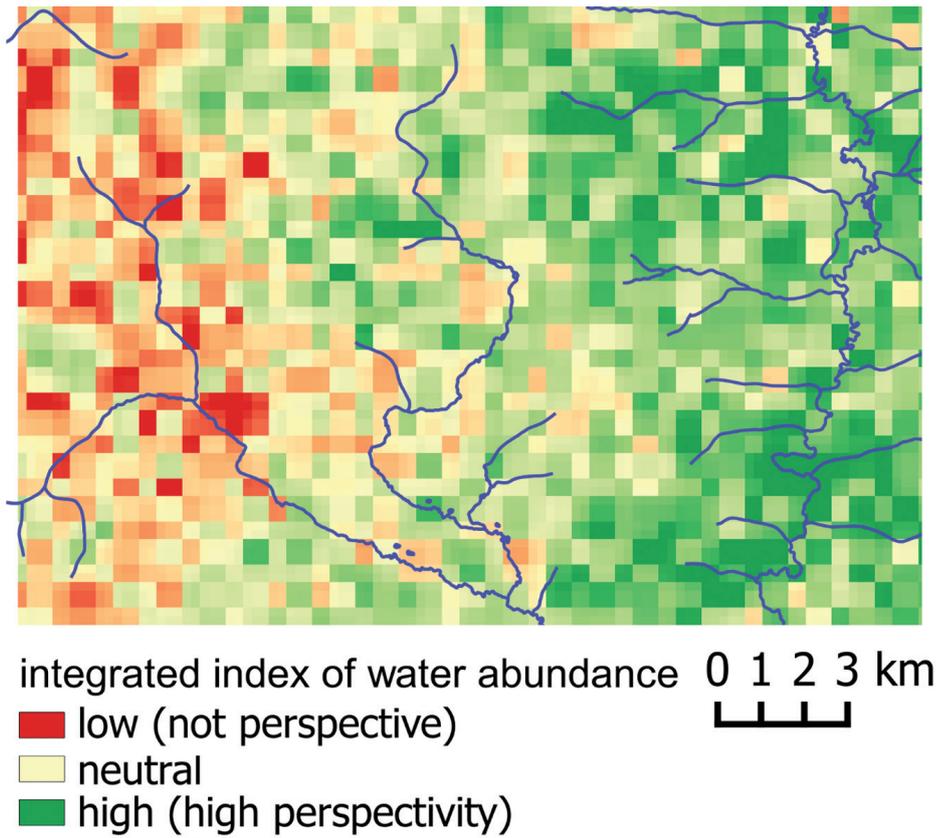


Рис. 9. Комплексный показатель водообильности

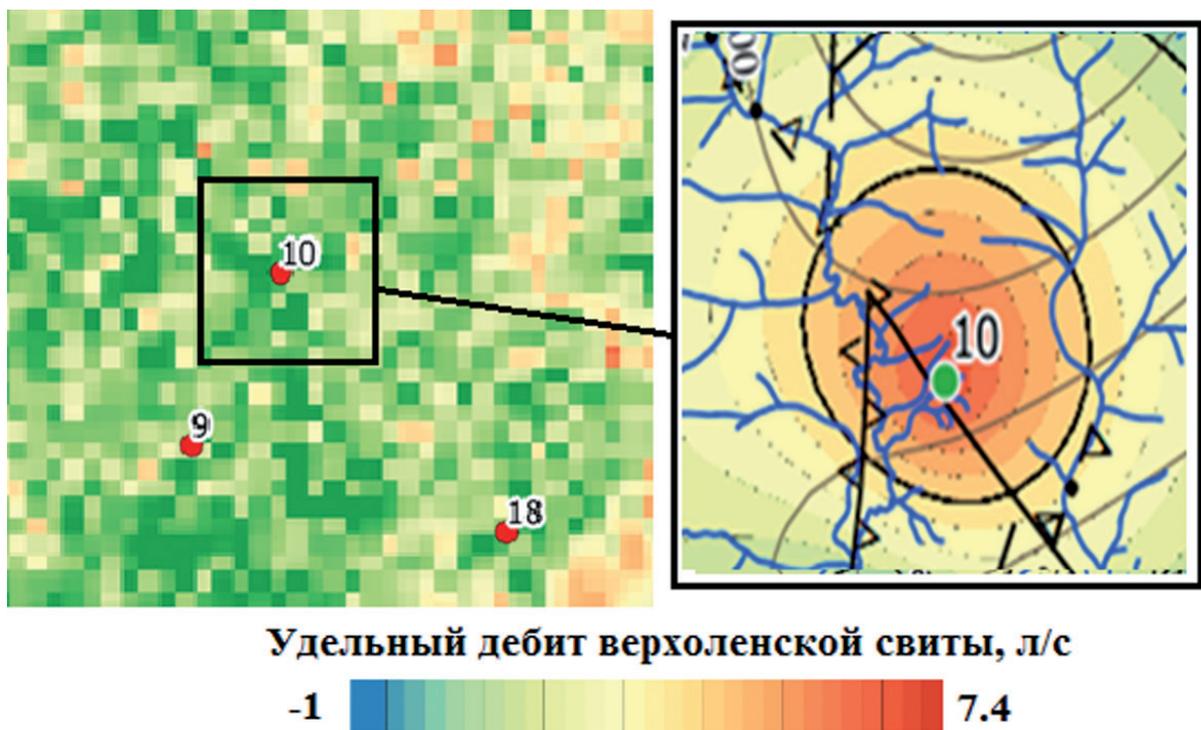


Рис. 10. Фрагменты схемы распределения комплексного показателя водоносности и схемы распределения коэффициента водопроницаемости

Разработанная технология рационально сочетает возможности экспертного и математического анализа и обеспечивает возможность экспрессного ранжирования территории по степени перспективности территории на подземные воды (или любые другие виды полезных ископаемых) уже на первых этапах ГРП, что повышает эффективность поисково-го бурения.

Технология прошла апробацию в ТКЗ в рамках выполнения проектных и поисково-оценочных работ на лицензионных участках Чонской группы месторождений, а также при выполнении научно-исследовательских работ. В результате можно сделать вывод, что предлагаемое картографическое представление и использованный для его формирования набор признаков в целом корректно характеризует гидрогеологическую обстановку и может использоваться как поисковый признак на воду разноцелевого назначения.

Более обоснованное прогнозирование позволило решить стоящие перед авторами геологические задачи, с сокращением разведочных скважин на 30% от проектного количества. Вероятность попадания скважины в перспективную область значительно возросла.

Разработанный подход в значительной степени универсален, в зависимости от поставленной задачи и масштаба исследований меняется только набор факторов, основные позиции методики и технологии обработки геоданных остаются неизменными. За счет этого технология может быть адаптирована для других видов полезных ископаемых.

**Ключевые слова:** ГИС, перспективная оценка, поисково-разведочное бурение, подземные воды, геопроцессинг, интегральный показатель.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аузина Л.И. Оценка гидрогеологических условий некоторых месторождений твердых полезных ископаемых Восточной Сибири с применением системно-модельного анализа // Методика поисков, разведки и оценки месторождений рудных полезных ископаемых. – 1997. – № 21. – С. 86-94.
2. 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.
3. Бруй А., Дубинин М. Классификация растровых данных при помощи DTclassifier для QGIS [Электронный ресурс]. – URL: <http://gis-lab.info/qa/dtclassifier.html> (дата обращения: 12.07.2016).
4. Паршин А.В., Демина О.И. Интегральные геохимические индикаторы в основе математико-картографического обеспечения экспертных геохимических географических информационных систем // Проблемы недропользования. – 2014. – № 2. – С. 53-59.
5. Филимонова Л.М., Паршин А.В., Бычинский В.А. Оценка загрязнения атмосферы в районе алюминиевого производства методом геохимической съемки снежного покрова // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 10. – С. 75-84.
6. Davydenko A.Y., Grayver A.V. Principal component analysis for filtering and leveling of geophysical data // J. Appl. Geophys. – 2014. – V. 109. – 266-280.
7. Riley S., De Gloria S., Elliot R. A Terrain Ruggedness Index that Quantifies Topographic Heterogeneity // Intermountain Journal of Sciences. – 1999. – V. 5. – 23-27 (Скопус).