

# Геология, поиски и разведка месторождений нефти и газа

---

УДК 571.1/613.1

**О МНОГОФАКТОРНОМ ПОДХОДЕ К ОЦЕНКЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ  
ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ И КОМПЛЕКСОВ ПРИ ОСВОЕНИИ  
НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ РАЙОНОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**  
ON MULTIVARIATE APPROACH TO EVALUATE THE PROTECTION OF AQUIFERS  
AT DEVELOPMENT OF WESTERN SIBERIA OIL-AND-GAS BEARING AREAS

**Ю. В. Беспалова**

Yu. V. Besspalova

*Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень*

*Ключевые слова: водоносный горизонт; техногенез; факторы защищенности;  
время просачивания; загрязняющие компоненты; мощность перекрывающих отложений;  
криолитозона*

*Key words: water-bearing horizon; security factors; infiltration time; polluting components;  
overburden depth; a cryolithozone*

Существует две проблемы экологической гидрогеологии — загрязнение и истощение подземных вод. Загрязнение гидросферы Земли на рубеже веков стало в один ряд с глобальными проблемами человечества.

Чистая вода уже не является легкодоступным природным продуктом потребления для человека, особенно это касается поверхностных вод. Подземные воды — сравнительно чистые, испытывают все большее негативное влияние со стороны хозяйственных объектов, поэтому проблема оценки защищенности их от поверхностных загрязнений становится все актуальнее.

Ресурсы пресных подземных вод распределены на Земле неравномерно, и многие регионы характеризуются очень низкой обеспеченностью.

Если сравнивать величину модуля подземного стока Западно-Сибирского мегабассейна (ЗСМБ) и Европейскую часть, то можно сделать вывод, что вопрос об истощении подземных вод на территории России остро не стоит. Модуль подземного стока на территории Литвы составляет от 0,5–1,5 до 2–5 л/с·км<sup>2</sup>, в Марокко — около 2,5 л/с·км<sup>2</sup>, в целом для Нигерийского артезианского бассейна — от 1 до 16 л/с·км<sup>2</sup>, в Германии максимальная величина модуля подземного стока отмечается на уровне 16 л/с·км<sup>2</sup> [1].

Величины модулей подземного стока в пределах Европейской части РФ закономерно уменьшаются с северо-запада на юго-восток от 6–4 л/сек с 1 км<sup>2</sup> в районах Прибалтики до долей литра в секунду с км<sup>2</sup> в степях южных районов России и Украины. В Западной Сибири с севера на юг отмечается уменьшение модулей от 3,0–2,5 в районе Обской губы и Енисейского залива до 0,5–0,3 л/с·км<sup>2</sup> в Северном Казахстане, Барабинской и Кулундинской степях [2].

Более значимой видится проблема загрязненности подземных вод под влиянием техногенеза. Данный вопрос в статье рассмотрен сквозь призму естественной защищенности основного водоносного комплекса, используемого для питьевого водоснабжения, его способности препятствовать проникновению загрязняющих компонентов.

Оценка естественной защищенности подземных вод от загрязнения относится к числу важных гидрогеологических проблем. В настоящее время масштабы техногенного воздействия на подземные воды превратились из локальных в региональные.

Наиболее простое и распространенное понимание природной защищенности подземных вод сводится к наличию в разрезе слабопроницаемых отложений на пути миграции загрязняющего компонента до исследуемого объекта.

Под защищенностью подземных вод от загрязнения понимается перекрытость водоносного горизонта отложениями (прежде всего слабопроницаемыми), препятствующими

щими проникновению загрязняющих веществ с поверхности земли в подземные воды. Защищенность зависит от многих факторов, которые можно разбить на три группы: природные, техногенные и физико-химические [3].

К основным *природным* факторам относятся: наличие в разрезе слабопроницаемых пород; глубина залегания подземных вод; мощность, литология и фильтрационные свойства пород (в первую очередь, слабопроницаемых), перекрывающих подземные воды; поглощающие (сорбционные) свойства пород; соотношение уровней (напоров) исследуемого и вышележащего водоносных горизонтов.

К *техногенным* факторам, прежде всего, следует отнести условия нахождения загрязняющих веществ на поверхности земли (хранение отходов в накопителях, шламохранилищах, сбросных котлованах и других промышленных бассейнах, сброс сточных вод на поля фильтрации, орошение сточными водами и др.) и определяемый этими условиями характер проникновения загрязняющих веществ в подземные воды.

К *физико-химическим* факторам относятся специфические свойства загрязняющих веществ, их миграционная способность, сорбируемость, химическая стойкость или время распада загрязняющего вещества, взаимодействие загрязняющих веществ с породами и подземными водами.

Оценка защищенности подземных вод может быть качественной и количественной. Первая основывается на природных факторах и производится по сумме условных баллов, а вторая – на природных, техногенных, а также физико-химических факторах (время распада загрязняющего вещества и его сорбируемости) и может быть выполнена на основе определения времени, за которое фильтрующиеся с поверхности земли загрязняющие вещества достигнут уровня подземных вод (грунтовых или напорных).

В частности, на территории Вартовского нефтегазоносного района ЗСМБ разрабатывается более тридцати нефтегазовых месторождений. Более сорока лет эксплуатируются самые крупные из них — Саянское и Ватинское. Суммарное количество извлеченных флюидов составило около 12 млрд т, в том числе суммарное количество добытой нефти — 2,6 млрд т. При этом через систему ППД закачано около 13 млрд м<sup>3</sup> рабочего агента (подземных, поверхностных и сточных вод). Добыча попутного газа составила 273 млрд м<sup>3</sup>, пресной подземной воды — 11 млн м<sup>3</sup> [4].

Во избежание трансформации естественных полей питьевых пресных подземных вод и появления новых — антропогенных, необходимо провести ряд исследований по естественной природной защищенности изучаемого района.

Вартовский нефтегазоносный район расположен в центральной части ЗСМБ. По отношению к тектоническому строению осадочного чехла изучаемая территория располагается в пределах крупной положительной структуры 1-го порядка — Нижневартковского свода.

Одной из важных задач данной работы является определение времени фильтрации, через которое загрязнение достигнет кровли атлым-новомихайловского водоносного комплекса, являющегося основным источником водоснабжения на территории всей Западной Сибири.

В данной статье автором выполнены расчеты по трем методикам определения времени фильтрации ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) загрязняющих компонентов до основного источника водоснабжения: по методикам [3], [5] и [6].

*Первая методика* [3] кроме основных геологических параметров (коэффициент фильтрации, мощность перекрывающих отложений, пористость водоупорных пород) учитывает и разность уровней грунтовых вод и нижележащего горизонта:

$$T_1 = \frac{m^2 \cdot n}{k \cdot \Delta H},$$

где  $\Delta H = H_1 - H_2$ ,  $H_1$  — уровень вышележащего горизонта;  $H_2$  — уровень исследуемого (нижележащего) горизонта;  $n$  — пористость водоупорных пород;  $m$  — мощность отложений, перекрывающих основной водоносный горизонт;  $k$  — коэффициент фильтрации, рассчитываемый по формуле

$$k_i = \frac{I m_i}{I' k}$$

где  $m_i$  — мощность отложений;  $k$  — коэффициент фильтрации отложений каждого слоя.

Вторая методика [5] учитывает модуль естественных ресурсов и слой стока подземных вод ( $h$ ).

Модуль естественных ресурсов ( $M_e$ ) для изучаемого района составляет 4,02 дм<sup>3</sup>/с\*км<sup>2</sup> [4, 7], следовательно, слой подземного стока равен

$$h = 31,536 * 4,02 = 126,774 \text{ мм/год или } 0,127 \text{ м/год.}$$

Интенсивность инфильтрационного питания ( $E$ ), соответствующая модулю подземного стока

$$E = \frac{0,127}{365} = 0,0003 \text{ м/сут.}$$

Время проникновения загрязнений рассчитывается по формуле

$$T = \frac{n_0 * m_0}{2 \sqrt[3]{(E^2 * k_0)}}$$

где  $n_0$  — активная пористость пород (в среднем взята за 0,15),  $m_0$  — мощность пород, перекрывающих атлым-новомихайловский водоносный комплекс,  $k_i$  — коэффициент вертикальной фильтрации.

По третьей методике [6] отличительным показателем является интенсивность инфильтрационного питания. Мощность перекрывающих отложений здесь не играет главенствующей роли

$$T_3 = \frac{\sqrt[4]{W^3 * k_0}}{\mu}$$

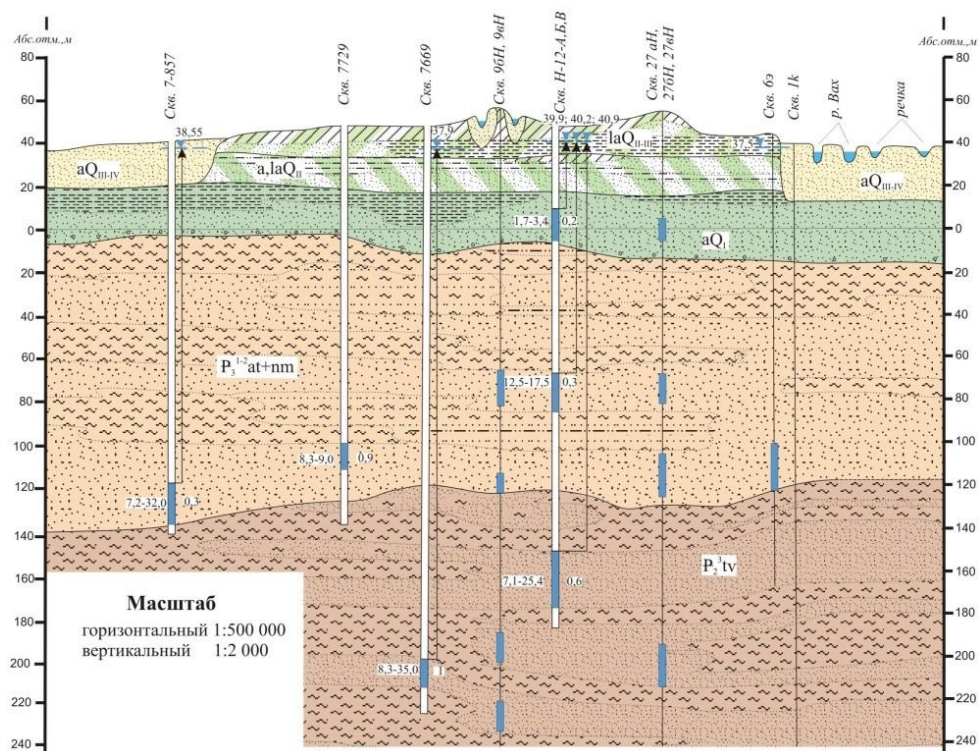
где  $W$  — интенсивность инфильтрационного питания исследуемой территории, которая определяется как 20 % от суммы атмосферных осадков (471 мм/год), 20 % — это 94 мм/год,  $0,094/365 = 0,00026$  м/сут;  $k_0$  — вертикальный коэффициент фильтрации, который в практике расчетов определяется как 1/20 от среднего коэффициента фильтрации четвертичного комплекса на водораздельных площадях;  $\mu$  — активная пористость пород четвертичного водоносного комплекса, равная 0,1.

Время просачивания до основного атлым-новомихайловского водоносного комплекса хозяйственно-питьевого назначения автором рассчитывалось по каждой скважине в отдельности с учетом вышеперечисленных параметров. Схема строения представлена на гидрогеологическом разрезе (рис. 1).

Время проникновения загрязнений через толщу перекрывающих отложений до кровли атлым-новомихайловского водоносного комплекса рассчитано по данным тридцати скважин. Средние значения времени просачивания по данным скважин, расположенных на линии разреза, представлены в таблице.

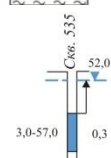
Атлым-новомихайловский водоносный комплекс сложен чередованием песчано-глинистых отложений мощностью 100–140 м. Напор изменяется от 108 до 154 м. Статистический уровень установлен на глубинах 2–8 м, абсолютные отметки — 37,5–53 м. Перекрывающая толща сложена озерно-аллювиальными четвертичными отложениями, водонасыщенная нижняя часть которых образует водоносный горизонт грунтовых вод. Грунтовые воды залегают на глубине 5–10 м. Мощность четвертичного водоносного горизонта варьирует в пределах 22–28 м.

Глубина установившегося уровня составляет около 8 м. В долине Оби и ее притоков разность уровней грунтовых и напорных вод мала, а на водоразделах составляет около 2 м.



Условные обозначения:

	Пески		Пески глинистые
	Пески с включением гальки		Алевриты
	Суглинки		Переслаивание песков, глин, алевритов
	Глины дочетвертичные		Глины четвертичные



Скважина гидрогеологическая (на разрезе). Цифры: Вверху - номер на карте; справа - минерализация, г/дм<sup>3</sup>; слева - первая - дебит, л/с; вторая - понижение, м; у стрелки - абсолютная отметка пьезометрического уровня. Стрелка соответствует напору подземных вод. Закраска соответствует составу вод в опробованном интервале (гидрокарбонатные-натриевые)

Границы:

	Водоносных подразделений
	а) установленные
	б) предполагаемые
	Литологические
	Распространения многолетнемерзлых пород (бергштрихи направлены в сторону распространения ММП)

Рис. 1. Гидрогеологический разрез по линии I-I [4]

Результаты расчетов среднего времени фильтрации ( $T_x$  средн.) загрязнений по изучаемым методикам

Номер скв.	Мощность перекрывающих отложений, м	$T_x$ средн.	Количество баллов
7-857	44	7 992	1
7729	50	8 414	2
7669	60	15 280	5



Продолжение таблицы

Номер скв.	Мощность перекрывающих	Тх средн.	Количество баллов
9 6Н, 9вН	62	11 160	3
Н-12 А, Б, В	54	15 078	5
27аН	68	9 767	2
6Э	60	11 217	3

Отмечается наличие глубокозалегающего реликтового слоя многолетнемерзлых пород (ММП), расположенных в центральной части карты и имеющих массивно-островное распространение. Мерзлыми породами являются песчаные и песчано-глинистые отложения новомихайловской и атлымской свит, глубина их кровли на водоразделах — 60–105 м, толщина — 45–100 м. Зона аэрации представлена неоднородными по составу и мощности участками с различным сочетанием проницаемых, слабо-проницаемых и непроницаемых отложений. В поймах рек глинистые отложения почти отсутствуют. На водоразделах зона аэрации и нижележащие четвертичные отложения существенно глинистые, суммарная мощность песчаных и глинистых слоев характеризуется соотношениями порядка 2:1. Общая мощность перекрывающих отложений составляет 40–70 м.

По усредненным расчетным значениям, полученным по трем методикам, построена карта защищенности атлым-новомихайловского водоносного комплекса, учитывающая время проникновения загрязнения через зону аэрации и толщу водонасыщенных четвертичных отложений (рис. 2).

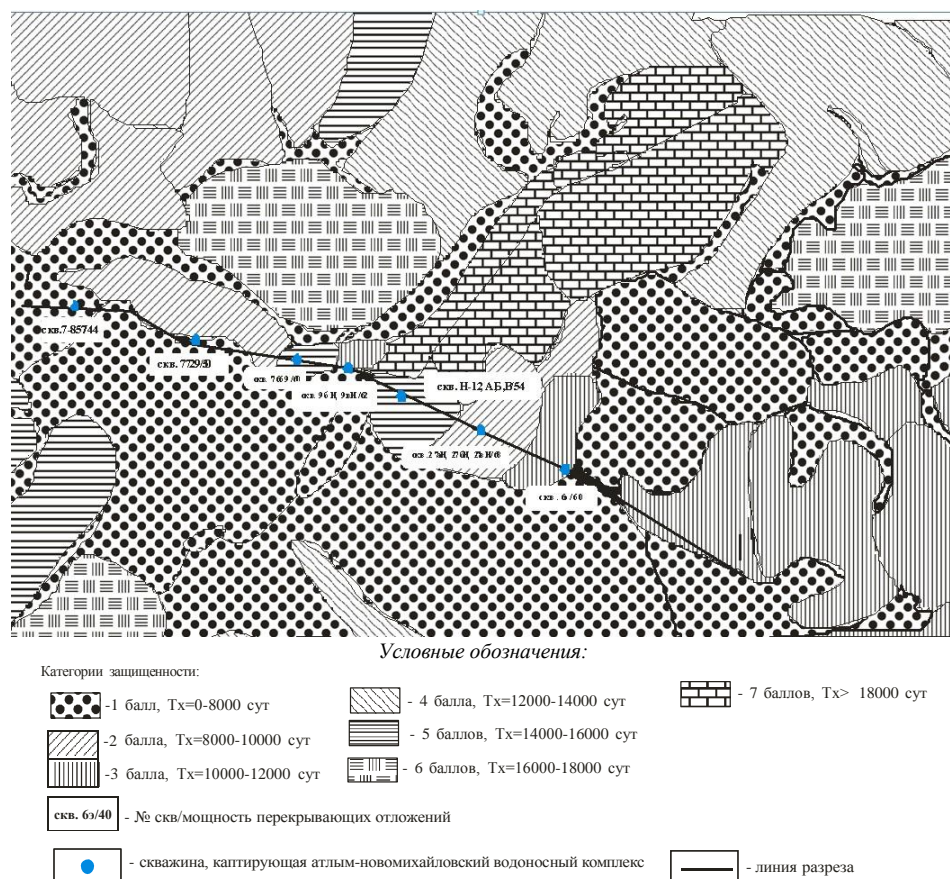


Рис. 2. Карта природной защищенности пресных питьевых подземных вод атлым-новомихайловского водоносного комплекса масштаба 1:500000

Автором предложена 7-балльная шкала естественной защищенности для Вартовского нефтегазоносного района: 1 балл — незащищенные подземные воды, 2 балла — слабозащищенные, 3 балла — условно защищенные, 4 балла — условно защищенные, 5 баллов — достаточно защищенные, 6 баллов — защищенные, 7 баллов — надежно защищенные.

Шкала учитывает расчетное время эксплуатации водоносных горизонтов, которое на практике составляет 25–50 лет.

Наибольшее распространение получили незащищенные подземные воды — 1 балл (время просачивания загрязнений 0–8 тыс. сут). Именно такая градация характерна для болотистой местности с существенно песчаными породами в поймах рек, через которые время проникновения загрязняющих компонентов составляет 7 992 суток (скв. 7-857).

Незащищенные подземные воды приурочены к долинам реки Оби и ее притокам, глубина вреза которых значительна. Данная категория рассчитана на период 22-летнего срока эксплуатации.

Болотные отложения широко распространены на всех геоморфологических уровнях рельефа. Отложения литологически представлены торфом разной степени разложения, иловатым суглинком, супесью с обильным включением растительного детрита и подчиненными прослоями песка. Мощность отложений колеблется от 1,5–3 м до 4–5 м.

Отложения талагайкинской свиты, представленные аллювием древних переуглубленных палеодолин Оби, Ваха и Ватинского Егана, распространены повсеместно, кроме участков водораздельных пространств. Осадки представлены тонко-мелкозернистыми кварцевыми песками, с маломощными прослоями суглинков и супесей. Сверху вниз отмечается укрупнение зернового состава песков от мелкозернистого до средне- и крупнозернистого, с примесью гравия и редкой гальки. Мощность отложений 8–22 м.

Областям с 2-балльной степенью защищенности (слабозащищенные) соответствуют участки развития 1-ой надпойменной террасы, распространенной в западной и центральной частях карты. Несмотря на значительную общую мощность перекрывающих отложений (35–68 м), глинистые отложения составляют не более 8–11 м, что недостаточно надежно изолирует подземные воды от загрязнений сверху в течение срока эксплуатации до 25 лет.

Превалирует русловая фация, представленная песком тонко- и мелкозернистым, кварцевым. В верхней части разреза пески пылеватые с подчиненными прослоями супесей и суглинков, отмечаются включения растительного детрита.

В центральной и восточной частях исследуемого района локально распространены зоны условно защищенных подземных вод (3 балла) на период до 33 лет эксплуатации. Мощность слабопроницаемых отложений 12–14 м. Отложения третьей надпойменной террасы представлены в кровле песком мелкозернистым, в подошве — алевритом и глиной алевритовой. В разрезе второй надпойменной террасы выделяется две пачки отложений: нижняя — песчаная, верхняя — глинистая. Нижняя преимущественно представлена песком и супесью, верхняя — алевритом, суглинком, глиной.

Четыре балла (условно защищенные) характеризуют площадь вдоль водоразделов в основном в северной части рассматриваемой территории. Здесь время проникновения загрязнения увеличивается до 14 тыс. суток, то есть на срок эксплуатации до 38 лет. Общая мощность перекрывающей толщи в среднем на данных участках равна 54 м, из них 15 м слагают глинистые отложения.

Реже встречаются участки достаточно защищенных вод (5 баллов) на период эксплуатации до 44 лет — центральная и восточная части карты, данная категория характеризуется 20-метровой толщей слабопроницаемых отложений. Эта зона типична для отложений второй-третьей надпойменных террас, где верхняя пачка представлена алевритом, суглинком, глиной, которые являются барьером на пути миграции загрязняющих компонентов в водоносный горизонт.

Зоны с 6-балльной степенью защищенности (защищенные) на срок эксплуатации до 49 лет приурочены к водоразделам, а также территориально приурочены ко второй и третьей надпойменным террасам, причем мощность слабопроницаемых отложений незначительно отличается от смежных участков.

Участки наиболее надежно защищенных вод автор отметил 7-балльной оценкой в области распространения ММП, выполняющих роль криогенного водоупора (северная часть карты), на весь период эксплуатации.

Благодаря наличию ММП и супесчано-суглинистых отложений, залегающих в кровле водоносных горизонтов, подземные воды загрязняются более медленно. Процесс их загрязнения на севере ЗСМБ носит часто необратимый характер. Вместе с тем, доступность подземных вод загрязнению прямо пропорциональна техногенной нагрузке на рельеф и обратно пропорциональна их естественной защищенности. В условиях площадного характера расположения объектов загрязнения и возможности проникновения поллютантов в подземные воды наиважнейшей задачей является оценка их защищенности [7].

Анализ расчетов авторов по каждой методике показывает, что максимальное время проникновения  $T_i$  (25 452 сут) получено по методике [3], а среди методик [5] и [6] данное значение существенно ниже и равно 15 750 сут. Это связано с тем, что  $T_x$  прямо пропорционально квадрату мощности перекрывающих отложений, величина которых изменяется от 35 до 68 м.

Таким образом, если рассчитывать  $T_i$  только по одной методике, то водоносные горизонты питьевых вод могут оказаться на самом деле слабо- или незащищенными, поэтому комплексный подход, изложенный в данной статье, позволяет учесть все ключевые параметры и дать более объективную характеристику естественной защищенности подземных вод. Для детального прогноза необходимо учитывать сорбционные свойства пород и фильтрующихся через них загрязнителей.

Сорбция тем больше, чем большую поверхность имеет твердая фаза [8]. Чем меньше энергия гидратации иона, тем больше его способность к электростатической сорбции. Чем больше заряд иона, тем лучше он сорбируется. Минералы глин могут быть как катионообменниками, так и анионообменниками. Сильными ионообменниками являются некоторые органические вещества, например, гуминовые кислоты, определенные капиллярно-люминисцентным анализом [8, 9], которые в пресных подземных водах ЗСМБ встречаются повсеместно.

С максимальной интенсивностью сорбционные и ионообменные процессы протекают в зоне гипергенеза, характеризующейся постоянно возникающими новообразованиями – ионообменниками, и малой минерализацией подземных вод, концентрации ионов в которых сопоставимы с обменной емкостью пород.

В состав глинистых толщ изучаемой территории входят преимущественно минералы группы монтмориллонита [10]. Обменная емкость монтмориллонитовых глин составляет 100–150 мг-экв/100 г, удельная поверхность на уровне 600–800 м<sup>2</sup>/г. Монтмориллонит обладает трехслойной решеткой (2:1). Поперечная электростатическая связь между пакетами монтмориллонита ослаблена, вследствие чего его решетка подвижна, и внутренняя поверхность доступна для ионов разного заряда, в том числе диполя воды. Поэтому удельная поверхность монтмориллонита велика, при этом 80 % обменных позиций приходится на межпакетную внутреннюю поверхность и только 20 % — на внешнюю. Глины монтмориллонитовой группы способны к гетеровалентным изоморфным замещениям, когда ионы с меньшим зарядом замещают в кристаллической решетке ионы с большим зарядом. Такой обмен определяет появление в кристаллической решетке нескомпенсированных отрицательных зарядов, которые компенсируются другими катионами [8].

Выявление пространственной дифференциации территории конкретного нефтегазового района по степени естественной защищенности от загрязнения позволяет выполнить оптимизацию расположения контрольных пунктов наблюдения за состоянием подземных вод, дополняющих существующую сеть мониторинга на участках, не защищенных от загрязнения.

#### Список литературы

1. Геологическая энциклопедия [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://dic.academic.ru> (дата обращения 23.03.15 г.).
2. Подземный сток на территории СССР и проблема водных ресурсов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://gas.ru> Куделин Б. И. (дата обращения 23.03.15 г.).
3. Забузов А. А. Положение об охране подземных вод. — М.: ВСЕГИНГЕО, 1985. — 21 с.

4. Вашурина М. В. Изучение пресных подземных вод Вартовского нефтегазоносного района: Дис. ...канд. г.-м. наук. – Тюмень, 2011.– С. 138.
5. Лапшин Н. Н., Орадовская А. Е. Рекомендации по гидрогеологическим расчетам для определения границ второго и третьего поясов зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1983
6. Шестаков В. М., Поздняков С. П. Геогидрология. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 176 с.
7. Бешенцев В. А. Техногенная нагрузка на подземные воды ЯНАО и оценка степени их защищенности // Известия вузов. Нефть и газ. – 2006. – № 2. – С. 116-121.
8. Крайнов С. Р., Швец В. М. Основы геохимии подземных вод. – М.: Недра, 1980. – 285 с.
9. Матусевич В. М. Геохимия подземных вод Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. – М.: Недра, 1976. – 157 с.
10. Матусевич В. М., Рыльков А. В., Ушатинский И. Н. Роль литогенеза, зон разломов и рифтовых систем в перераспределении вещества и энергии в ЗСМБ // Известия вузов. Нефть и газ. – 2004. – № 2. – С. 4-11.

***Сведения об авторе***

**Беспалова Юлия Владимировна**, ассистент кафедры «Геология месторождений нефти и газа», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)390346, e-mail: [bespalova\\_y@mail.ru](mailto:bespalova_y@mail.ru)

***Information about the author***

**Bespalova J. V.**, assistant of the chair «Geology of oil and gas fields», Tyumen State Oil and Gas University, phone: 8(3452)390346, e-mail: [bespalova\\_y@mail.ru](mailto:bespalova_y@mail.ru)