

УДК 556.334.4

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРОД В
ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ПЛАТФОРМ И ИХ ПРАКТИЧЕСКИЕ
ПРИЛОЖЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН)**

Мусин Р. Х., Мусина Р. З.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Аннотация. Рассмотрены гидрогеологические условия зоны активного водообмена одного из регионов Татарстана. Определены характер и основные факторы фильтрационной неоднородности наиболее продуктивной на питьевые подземные воды части разреза. Проведена оценка ресурсного потенциала и масштаба геологической деятельности пресных подземных вод.

Ключевые слова: коэффициенты фильтрации, водопроницаемость, модули стока.

**The patterns of changes in the penetration of the rocks in the upper part of the
platform's sedimentary sheath and their practical applications (in terms of the Republic of
Tatarstan)**

Musin R. Kh., Musina R. Z.

Annotation. Hydrogeological conditions of active water exchange zone of one of the regions of Tatarstan were examined. There were determined the character and heterogeneity of the filtration factors of the most productive part of section for the drinking underground water. The resources potential and the scale of the geological activity of fresh underground water were evaluated.

Key words: hydraulic conductivity, transmissivity, module of flow.

Характерной особенностью строения континентальных платформ, как известно, является наличие субгоризонтально залегающего осадочного чехла, сложенного породами, водопроницаемость которых может варьировать в очень широких пределах – $n \cdot 10^{-7}$ – $n \cdot 10^3$ м/сут. Актуальной проблемой большей части гидрогеологических исследований является выявление закономерностей изменения проницаемости основных разновидностей пород по площади их распространения и в разрезе. Одними из таких закономерностей являются – снижение водопроницаемости минеральных сред с увеличением глубины их залегания и её увеличение по мере приближения к речным долинам или другим эрозионным понижениям. В реальности количество факторов,

контролирующих характер и направленность изменения фильтрационной способности пород, намного больше. Они определяются геоморфологическими, геолого-гидрогеологическими и геодинамическими условиями конкретных объектов (площадей). В статье рассматриваются данные по закономерностям изменения проницаемости водовмещающих пород одного из водоносных комплексов Восточно-Закамского региона Республики Татарстан (рис.1).

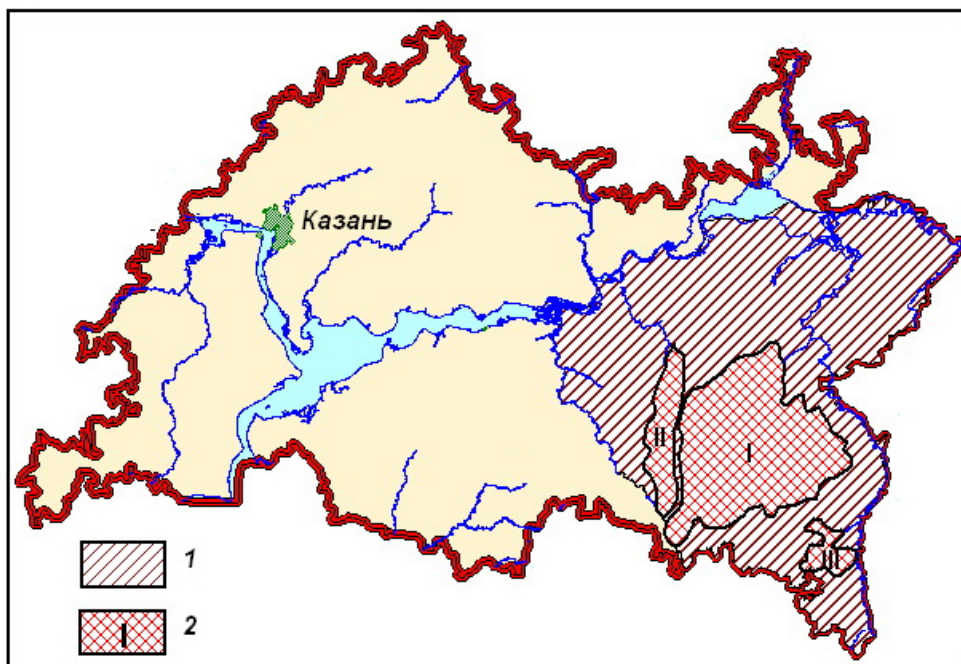


Рис. 1. Расположение Восточно-Закамского региона в границах Татарстана:

I – Восточно-Закамский регион; *2* – площади крупных нефтяных месторождений и их номера: *I* – Ромашкинское, *II* – Ново-Елховское, *III* – Бавлинское

Восточно-Закамский регион расположен в пределах Южно-Татарского свода (ЮТС) Волго-Уральской антеклизы Восточно-Европейской платформы и в пределах Восточно-Русского сложного артезианского бассейна блоково-пластовых вод. Площадь региона – около 20 тыс. км². Здесь с середины XX в. разрабатываются такие крупные нефтяные месторождения, как Ромашкинское, Ново-Елховское и Бавлинское. Многолетняя эксплуатация этих объектов не могла не сопровождаться рядом негативных явлений, что в свою очередь обусловило проведение на данной территории многочисленных разномасштабных и разноплановых исследований. И в настоящее время степень геолого-гидрогеоэкологической изученности Восточно-Закамского региона является одной из наиболее высоких не только в Татарстане, но и в России в целом.

Зона активного водообмена Восточно-Закамского региона обладает мощностью до 300-350 м и охватывает комплекс пермских и плиоцен-четвертичных образований (рис. 2). Пермские отложения в объеме уфимского, казанского, уржумского и северодвинского

ярусов характеризуются максимальным площадным распространением. Они отличаются широким спектром фациальных условий формирования – от морских (верхнешельфовых) до континентальных (озерных, аллювиальных и др.) [4, 5, 10]. Морские отложения обладают, преимущественно, карбонатно-терригенным составом и серой окраской, мощности их отдельных прослоев могут достигать 20 м, реже более; тогда как континентальные – в основном представлены песчано-глинистыми пестроцветными образованиями, с толщиной прослоев редко когда превышающей 6–8 м. Важной чертой пермской толщи является ее загипсованность, степень которой нарастает в восточном направлении. Гипсы отмечаются как в виде редких мелких включений, так и отдельных невыдержанных слоёв до 0,5–2,0 м, реже более. Плиоцен-четвертичные отложения представлены песчано-глинистыми породами. Максимальной мощностью (до 210 м) они обладают в палео- и современных речных долинах, ширина которых обычно не превышает 10–15 км.

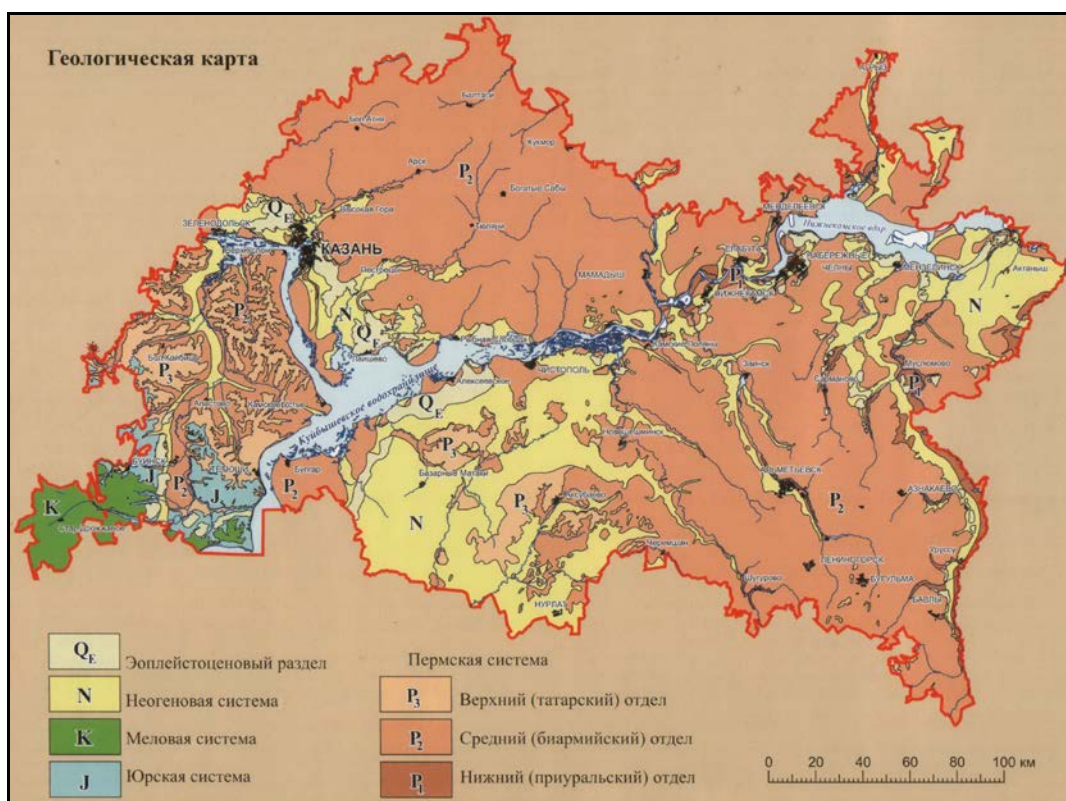


Рис.2. Схематическая геологическая карта Татарстана [4]

В рассматриваемой осадочной толще выделяется ряд водоносных и слабоводоносных комплексов, связанных межпластовым взаимодействием (перетеканием) по схеме А. Н. Мятиева, из них наиболее продуктивным на питьевые подземные воды является водоносный нижнеказанский комплекс. Этот комплекс приурочен к сульфатно-карбонатно-терригенным отложениям “надлингуловой” части разреза одноименного подъяруса, включающей образования (сверху-вниз) красноярской, камышлинской и

верхней части байтуганской толщ [5, 10]. Основание последней, сложенное, преимущественно, известковыми глинами и алевролитистыми глинами темно-серой окраски с многочисленными остатками брахиопод *Lingula orientalis*, и представляющее пачку “лингуловых глин”, относят к водоупорному нижнеказанскому горизонту. Разрез нижнеказанского водоносного комплекса характеризуется четко выраженной ритмичностью и фациальной неоднородностью. Основания отдельных ритмов обычно представлены песчано-глинистыми породами, а прикровельные их части – глинисто-карбонатными. Фациальные условия их формирования варьируют от морских шельфовых до континентальных озерных и аллювиальных. При этом смена морских фаций континентальными в строении нижнеказанского комплекса отмечается как по вертикали – снизу-вверх по разрезу, так и по латерали – с юго-запада на северо-восток. Комплекс развит в пределах всего региона, за исключением отдельных довольно узких линейных зон палео- и современных речных долин. Он вскрывается в нижних частях долин, по мере удаления от которых последовательно перекрывается верхнеказанскими, уржумскими и северодвинскими карбонатно-терригенными отложениями. Глубина залегания его кровли может достигать 180 м. Водовмещающими породами обычно являются песчаники и известняки с доломитами, формирующими прослойки толщиной до 6–8 м, реже более. Мощность комплекса в наиболее полных разрезах – 60–80 м, а значения её эффективной части обычно не превышают 40 м (рис. 3).

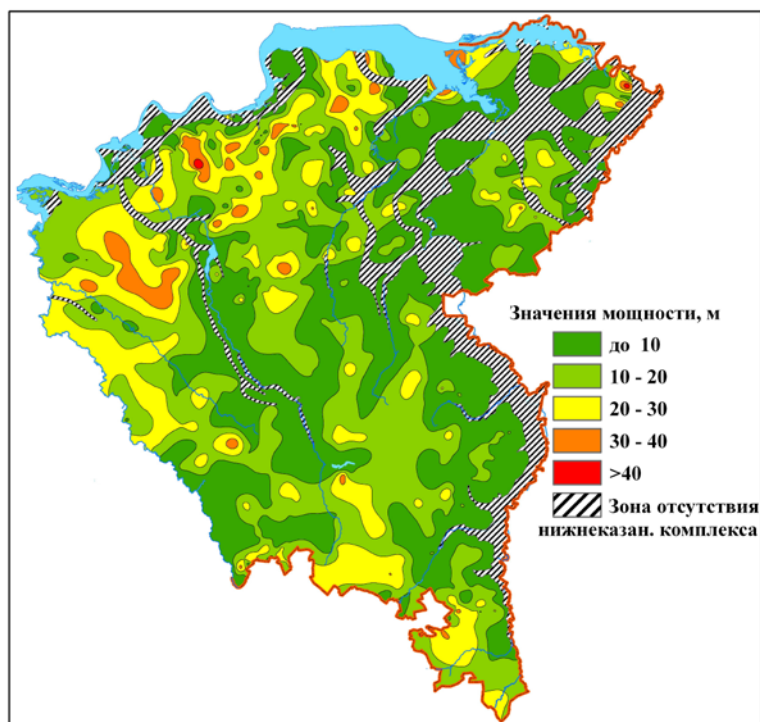


Рис. 3. Карта эффективной мощности нижнеказанского водоносного комплекса

Гипсы в виде отдельных прослоев (до 2,5 м), линз и мелких включений преимущественным развитием пользуются в восточной и южной части региона. Питание нижеказанского водоносного комплекса осуществляется, главным образом, за счет инфильтрации атмосферных осадков и перетекания из перекрывающих образований, а основной объем разгрузки приходится на многочисленные источники и фильтрацию в палео- и современные речные долины. Пьезометрическая поверхность в сглаженной форме повторяет современный рельеф. В пределах крупных долин комплекс обладает грунтовым характером, на водораздельных же участках величина избыточного напора может достигать 160 м. Водообильность нижеказанских отложений средняя: преобладающие расходы родников – 0,5–5 л/с, удельные дебиты скважин – 0,3–2 л/с*м.

Фактическим материалом для выявления фильтрационной неоднородности нижеказанского комплекса послужили разрезы 2308 скважин и 79 обнажений, результаты опытно-фильтрационного опробования 552 скважин, данные 122 лабораторных определений водопроницаемости отдельных разновидностей пород (рис. 4, табл. 1).

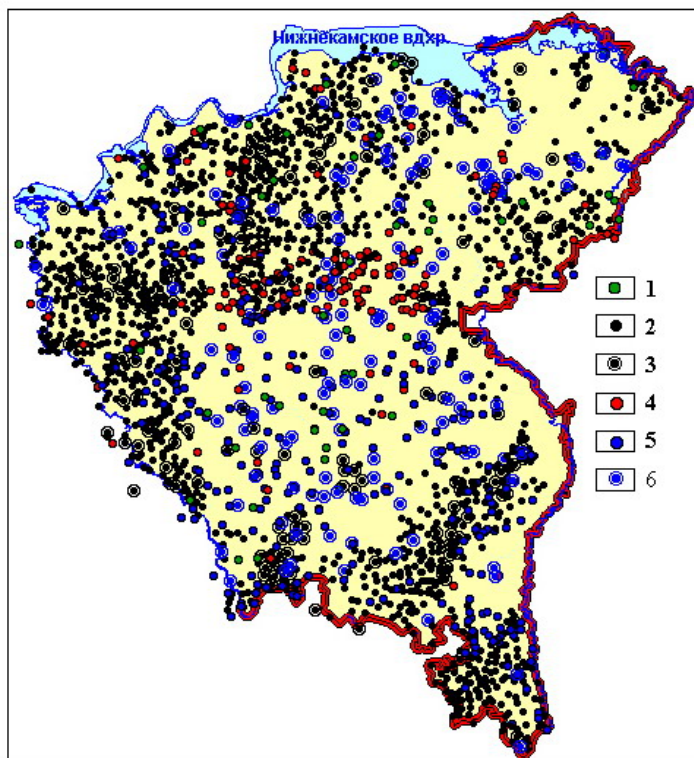


Рис. 4. Карта фактического материала:

1 – обнажения, 2–6 – скважины: 2–3 – структурного бурения: 2 – без отбора керна, 3 – с отбором керна по всему стволу; 4–5 – поисково-разведочные: 4 – геологические, 5 – гидрогеологические; 6 – водозаборные

Наиболее достоверно фильтрационная способность пород, слоистой толщи в целом, определяется по данным опытно-фильтрационных работ. Именно на их базе и

проведено выявление характера и обусловленности фильтрационного поля (фильтрационной анизотропии) нижеказанского водоносного комплекса. При этом учитывались установленные в процессе откачек коэффициенты фильтрации лишь песчаников (483 определения) и известняков с доломитами (343 определения), как основных коллекторов подземных вод. В целом, в разрезе нижеказанского комплекса преобладают мелкозернистые песчаники различной степени сцементированности и известняки (доломиты) пелитоморфной структуры.

Таблица 1

Значения коэффициентов фильтрации пород нижеказанского подъяруса

Литотипы	Методы определения водопроницаемости		
	лабораторные		опытно-фильтрационные работы (одиночные и кустовые откачки, м/сут)
	ЯМР (мД)	трубка СПЕЦГЕО (м/сут)	
глины	10–71	–	до 0,5
алевролиты	103–395	–	0,09–3,7
песчаники	13–1007	0,5–6,0	0,003–150
мергели	20–48	–	0,34–8,8
известняки и доломиты	1–182	–	0,006–610

При довольно высокой изменчивости водопроницаемости значения коэффициентов фильтрации до 10 м/сут для песчаников отмечаются в 80–90 %, а известняков – 65–80 % случаев. Максимальная водопроницаемость песчаников в большинстве случаев не превышает 30, а известняков – 50 м/сут. Более высокие величины являются аномальными, и их доля составляет ~ 3 %. По данным лабораторных определений следует, что коэффициенты фильтрации до 6–10 м/сут в основном определяются поровым, порово-каверновым типами скважности, а более высокие значения обуславливаются дополнительной скважностью, вызванной трещиноватостью пород. При равной степени трещиноватости практически отсутствуют различия в проницаемости литологически однотипных пород, характеризующихся отличными структурно-текстурными показателями и (или) положением в разрезе нижеказанского комплекса.

Трещиноватость пород определяется спецификой процессов диагенеза, полем тектонических напряжений, характером и интенсивностью проявления экзогенных процессов. Последние два фактора во-многом определяют геоморфологические и структурные особенности территорий. В связи с этим, появляется возможность оценки степени трещиноватости пород и, соответственно, их водопроницаемости по орографическим и геолого-структурным параметрам. Для выявления основных факторов,

влияющих на фильтрационную способность пород, статистическими методами проанализированы следующие формализованные параметры:

- гипсометрический, представленный 4 уровнями глубин залегания водовмещающих пород;
- геоморфологический, в составе которого рассматривались 7 элементов от наиболее крупных речных долин до осевых зон основных водоразделов;
- структурный, в виде 4 типов положения в пределах локальных структур, выделенных по подошве пачки “лингуловые глины” (рис. 5);
- геологический или палеогеоморфологический, учитывающий наличие неогеновых врезов и представленный 3 вариантами расположения скважин с известными величинами коэффициентов фильтрации относительно этих образований;
- фациальный, в виде 3 типов фациальных обстановок формирования пород;
- склоновый (геоморфологический–2), отражающий 4 формы поверхностных склонов;
- техногенный, представленный 3 вариантами разработки нефтяных месторождений.

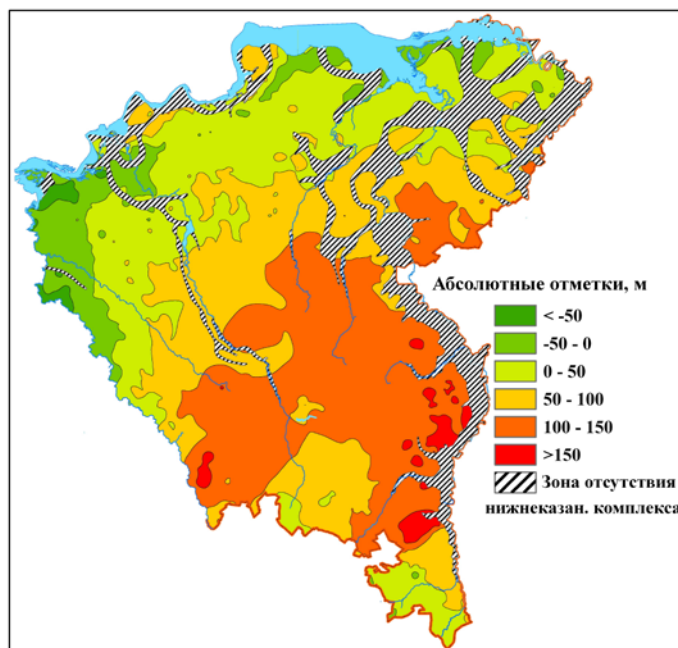


Рис. 5. Структурная карта Восточно-Закамского региона по подошве пачки “лингуловые глины” нижнеказанского подъяруса

Формализация (оцифровка) каждого указанного параметра проведена для скважин, сопровождавшихся опытно-фильтрационными опробованиями, следующим образом.

Гипсометрический параметр: 1 – глубина залегания водоносных интервалов не превышает 50 м; 2 – 50–100 м; 3 – 100–150 м; 4 – более 150 м.

Геоморфологический параметр, отражающий местоположение скважин: 1 – речные долины первого и второго порядков (протяженность долин более 50 км); 2 – речные долины третьего и четвертого порядков (протяженность – 10–50 км); 3 – речные

долины пятого порядка и резко выраженные овраги; 4 – нижние и средние части водораздельных склонов долин первого и второго порядков; 5 – нижние части водораздельных склонов долин третьего и четвертого порядков; 6 – средние части водораздельных склонов долин третьего и четвертого порядков, и склоны долин пятого порядка; 7 – верхние части водораздельных склонов и осевые зоны водоразделов.

Структурный параметр, также фиксирующий местоположение скважин: 1 – осевые части отрицательных структур; 2 – осевые части положительных структур; 3 – склоны структур пологие; 4 – склоны крутые и средней крутизны.

Геологический (палеогеоморфологический) параметр: 1 – скважины расположены на значительном удалении от неогеновых врезов; 2 – находятся в ближайшей 2–3 км зоне от них; 3 – нижнеказанские образования испытаны под толщей плиоценовых отложений.

Фациальный параметр, учитывающий условия формирования водовмещающих пород: 1 – формирование нижнеказанских пород происходило в морских условиях (сероцветные отложения); 2 – в переходных фациях (серо- и пестроцветные отложения); 3 – в континентальных условиях (пестроцветные образования).

Параметр, отражающий характер склонов в районе расположения скважин: 1 – субгоризонтальные склоны; 2 – пологие склоны (с углом наклона до 10°); 3 – склоны средней крутизны ($10 - 25^{\circ}$); 4 – крутые ($>25^{\circ}$).

Техногенный параметр: 1 – опробованные в фильтрационном отношении скважины расположены вне контуров нефтяных месторождений; 2 – в контурах мелких разрабатываемых месторождений; 3 – в пределах площадей Ромашкинского, Ново-Елховского и Бавлинского месторождений.

Корреляционный анализ значений коэффициентов фильтрации песчаников, известняков и указанных оцифрованных параметров, проведенный для всей совокупности данных и, отдельно, по каждой крупной тектонической единице ЮТС (рис. 6), показал, что фильтрационная способность пород значимо связана с первыми пятью параметрами (табл. 2).

Эти параметры и являются основными факторами фильтрационной анизотропии. Роль каждого из них, при неизменности значений других параметров, проявлена следующим образом.

– Гипсометрический фактор: резкое уменьшение водопроницаемости отмечается с глубин 80–100 м, коэффициенты различия значений проницаемости для глубинных интервалов 0–50 и 100–150 м могут достигать 8.

– Геоморфологический фактор: водопроницаемость уменьшается до 4,7 раз при переходе от наиболее крупных речных долин к центральным частям водораздельных склонов;

повышенная фильтрационная способность пород отмечается и в зонах пересечения нескольких долин.

– Структурный фактор: максимальны коэффициенты фильтрации в сводовых частях положительных структур и на их крутых крыльях, коэффициенты различия в сравнении с иным структурным положением – до 2–3.

– Геологический или палеогеоморфологический фактор: водопроницаемость повышена до 3–5 раз в ближайшей 2–3 км зоне от контуров плиоценовых эрозионных врезов, тогда как под этими палеодолинами она ведет себя двойственно – в пределах открытых в гидрогеологическом отношении структур (см. далее), где мощность плиоценовых песчано-глинистых отложений обычно невелика, отмечается повышенный фильтрационный фон, тогда как в пределах полузакрытых структур, характеризующихся значительным площадным распространением и повышенной мощностью плиоценовых образований, фильтрационная способность нижеказанских пород довольно резко уменьшена; последнее связано, вероятно, с кольматацией порово-трещинного пространства.

– Фациальный фактор: сероцветные морские отложения нижеказанского подъяруса характеризуются большей водопроницаемостью в сравнении с красноцветными континентальными литоаналогами, при этом коэффициенты различия – до 1,5; значим этот фактор для песчаников.

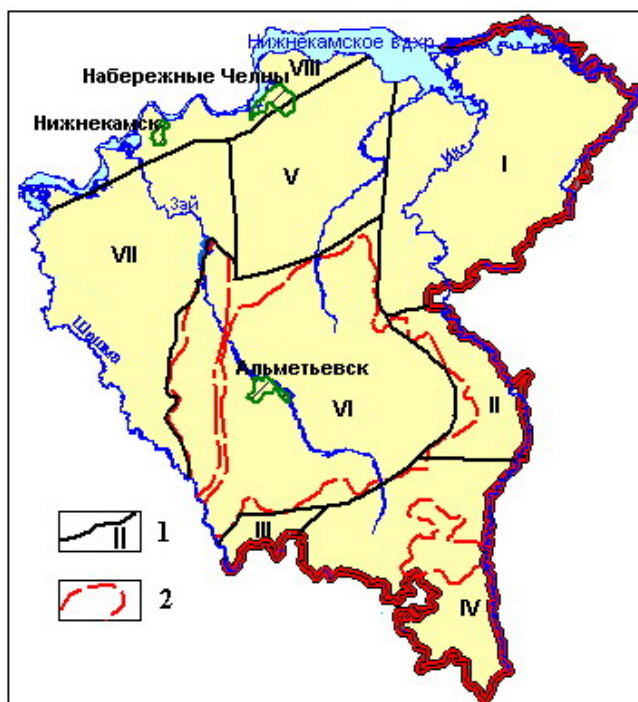


Рис. 6. Тектоническая схема Восточного Закамья Татарстана по Е.Д. Войтовичу [2]:

I – границы структурных элементов и их номера: I-VII – структуры ЮТС: I – северо-восточный склон, II – восточный склон, III – южный склон, IV – юго-восточный

склон, V – северный склон, VI – сводовая часть, VII – западный склон, VIII – юго-восточный склон Северо-Татарского свода; 2 – контуры крупных нефтяных месторождений

Таблица 2

Примеры корреляционных связей фильтрационной способности пород нижнеказанского комплекса с отдельными геолого-структурными, геоморфологическими и техногенными параметрами

Факторы и параметры	Структурные элементы, литология			
	западный склон ЮТС		сводовая часть ЮТС	
	песчаники	известняки	песчаники	известняки
гипсометрический	-0,21	-0,40*	-0,36*	-0,25
геоморфологический	-0,37*	-0,20	-0,30*	-0,39*
структурный	0,23	0,20	0,21*	0,14
геологический	0,56*	0,51*	0,52*	0,58*
фациальный	-0,38*	-0,33	-0,36*	-0,26
склоновый	-0,0	-0,17	0,07	0,07
техногенный	-0,15	-0,02	-0,05	0,03

Примечание. Коэффициенты парной корреляции, помеченные *, являются значимыми.

Влияние первых четырех факторов на параметр водопроницаемости легко объяснимо, т.к. они взаимосвязаны со степенью трещиноватости пород. С глубиной происходит уменьшение пористости и трещиноватости пород; реки закладываются вдоль ослабленных зон, речные долины являются зонами развития трещин бортового отпора, возникающих за счет снятия геостатической нагрузки; неогеновые образования часто маркируют палеореки и по геофизическим данным фиксируется их отчетливая связь, как и современных рек, с активизированными разломами фундамента; осевые части антиклинальных структур, вне зависимости от их образования за счет продольного или поперечного изгибов, характеризуются проявлением растягивающих напряжений и более интенсивное растяжение отмечается на крутых структурных крыльях. Фациальный же фактор определяет величину поровой скважности. Песчаники континентальных фаций, в отличие от морских, являются гранулометрически более неоднородными и глинистыми, что обуславливает уменьшение их эффективной пористости и, соответственно, водопроницаемости. Роль отмеченных факторов в фильтрационной неоднородности геологического разреза резко проявляется на глубинных уровнях до 100 м. С увеличением глубины залегания вариации водопроницаемости пород приповерхностной зоны постепенно сглаживаются, а ниже 150 м ее значения практически не превышают 0,13 м/сут, и они уже не зависят от рассмотренных геолого-геоморфологических условий. Максимальные значения фильтрационной способности пород (в том числе и аномальные) проявляются при определенном сочетании всех вышеотмеченных факторов. Зоны такого сочетания при оптимальных гидрогеохимических условиях представляют собой потенциальные месторождения питьевых подземных вод.

С выявлением факторов, определяющих основные особенности поведения фильтрационного поля нижеказанского комплекса, появляется возможность расчета наиболее вероятных значений коэффициентов фильтрации слагающих его песчаников и известняков для различных условий их гипсометрического, геоморфологического, геологического и структурного положения. Так было выявлено по 252 значения фильтрационной способности каждой литологической разности пород-коллекторов в пределах каждой структурной единицы ЮТС. В качестве примера в таблице 3 приведены реальные и расчетные коэффициенты фильтрации для пород сводовой части этой структуры. Табличные данные довольно адекватно отражают реальные флуктуации коэффициентов фильтрации в пластовых условиях, и они позволяют определить водопроницаемость конкретных пород в любых геолого-геоморфологических условиях их залегания без проведения дорогостоящих опытно-фильтрационных работ.

Наиболее открытыми в гидрогеологическом отношении структурами ЮТС являются (по средним значениям коэффициентов фильтрации в различных геолого-геоморфологических условиях): его сводовая часть и юго-восточный склон, в несколько меньшей степени западный склон, остальные тектонические элементы можно отнести к полужакрытым структурам. Такое изменение фильтрационных характеристик обусловлено строением и формированием свода, а также фациальными особенностями нижеказанских отложений. Открытость указанных составляющих ЮТС скорее всего связана с окончательным штамповым механизмом его формирования в постпермское время. Этот механизм предполагает проявление максимальных растягивающих напряжений в пределах наиболее крутых склонов положительной структуры [1], каковыми и являются юго-восточный и западный склоны ЮТС. В центральной же части штамповой структуры отмечается сжатие поперек слоистости и растяжение вдоль нее, что благоприятно для образования крутых трещин отрыва и определивших повышенный фон проницаемости пород в сводовой части ЮТС. Кроме этого, раскрытость этих трех структурных элементов предопределилась и активными новейшими движениями восходящего характера, вызвавших максимальный подъем и интенсивную расчлененность рельефа в их пределах, и подновление существовавшей системы открытых трещин без изменения их кинематического типа. Менее благоприятные условия для формирования открытых трещин в пределах остальной части ЮТС, проявленные в донеогеновое время, не изменились и в новейший этап развития Восточно-Закамского региона Татарстана. Поэтому северный, северо-восточный, восточный и южный склоны свода характеризуются более однородным распределением пониженных значений фильтрационной способности пород-коллекторов. К тектонической фрактальности ЮТС,

в основном и обусловившей этот характер пространственной фильтрационной неоднородности, добавляется и фациальный фактор.

Таблица 3

Коэффициенты фильтрации (м/сут) песчаников и известняков нижнеказанского водоносного комплекса в пределах сводовой части ЮТС

Лито лог.	Геол. условия	Уровни глубин			Геол. условия	Уровни глубин			Геол. условия	Уровни глубин			Геол. условия	Уровни глубин		
		1	2	3		1	2	3		1	2	3		1	2	3
Песч.		12,0	7,5	3,0		13,0	8,1	3,2		12,0	7,5	3,0		13,5	8,4	3,4
Изв.	I-1-1	13,0	8,0	3,1	I-2-1	14,0	8,0	3,1	I-3-1	13,0	8,0	3,1	I-4-1	14,0	8,5	3,4
Песч.		13,2	9,8	3,3		14,3	10,5	3,5		13,2	9,8	3,3		14,9	10,9	3,7
Изв.	I-1-2	52,0	32,0	6,2	I-2-2	56,0	32,0	6,2	I-3-2	52,0	32,0	6,2	I-4-2	56,0	34,0	6,8
Песч.		25,2	15,8	4,5		27,3	17,0	4,8		25,2	15,8	4,5		28,4	17,6	5,1
Изв.	I-1-3	32,5	20,0	4,0	I-2-3	35,0	20,0	4,0	I-3-3	32,5	20,0	4,0	I-4-3	35,0	21,3	4,4
Песч.		7,3	4,0	1,6		7,5	4,0	1,6		7,4	4,0	1,6		7,5	4,3	1,7
Изв.	II-1-1	10,0	5,0	2,0	II-2-1	12,9	5,4	2,1	II-3-1	12,0	4,3	1,7	II-4-1	13,0	4,3	1,7
Песч.		7,4	5,2	1,8		7,5	5,2	1,8		7,4	5,2	1,8		7,5	5,6	1,9
Изв.	II-1-2	40,0	20,0	4,0	II-2-2	46,7	21,6	4,2	II-3-2	50,0	17,2	3,4	II-4-2	52,0	17,2	3,5
Песч.		15,3	8,4	2,4		15,8	8,4	2,4		15,5	8,4	2,4		15,8	9,0	2,5
Изв.	II-1-3	25,0	12,5	2,6	II-2-3	32,3	13,5	2,7	II-3-3	30,0	10,8	2,2	II-4-3	32,5	10,8	2,3
Песч.		6,0	3,8	1,5		6,4	4,0	1,6		7,5	3,6	1,4		11,0	4,3	1,7
Изв.	III-1-1	6,5	4,0	1,6	III-2-1	10,8	5,0	2,0	III-3-1	7,5	4,9	2,0	III-4-1	12,0	6,5	1,7
Песч.		7,2	4,9	1,7		9,0	5,2	1,8		9,0	4,7	1,5		12,1	5,6	1,9
Изв.	III-1-2	26,0	16,0	3,2	III-2-2	43,2	20,0	4,0	III-3-2	30,0	19,6	4,0	III-4-2	50,0	26,0	3,4
Песч.		12,6	8,0	2,3		18,0	10,0	2,4		15,8	7,6	2,1		20,0	9,0	2,5
Изв.	III-1-3	16,3	10,0	2,1	III-2-3	35,0	15,0	2,6	III-3-3	18,8	12,3	2,6	III-4-3	40,0	16,3	2,2
Песч.		2,3	1,1	0,4		5,6	4,0	1,5		5,0	3,6	2,0		6,0	4,3	1,6
Изв.	IV-1-1	3,0	1,7	0,7	IV-2-1	11,0	5,4	2,0	IV-3-1	9,1	4,3	2,5	IV-4-1	11,0	4,5	1,8
Песч.		2,8	1,4	0,4		6,7	5,2	1,7		6,0	4,7	2,2		7,2	5,6	1,8
Изв.	IV-1-2	12,0	6,8	1,4	IV-2-2	40,0	21,6	4,0	IV-3-2	36,4	17,2	4,5	IV-4-2	40,0	17,2	3,6
Песч.		4,8	2,1	0,6		11,8	8,4	2,3		10,5	7,6	3,0		12,6	9,0	2,4
Изв.	IV-1-3	7,5	4,3	0,9	IV-2-3	30,0	13,5	2,6	IV-3-3	22,8	10,8	3,0	IV-4-3	27,5	10,8	2,3
Песч.		4,3	2,7	1,1		5,0	4,0	1,5		4,0	3,6	1,4		5,1	3,5	1,4
Изв.	V-1-1	5,2	2,6	1,0	V-2-1	6,7	5,0	2,0	V-3-1	5,7	3,5	1,4	V-4-1	10,0	5,0	2,0
Песч.		5,2	3,8	1,2		6,0	5,2	1,7		4,8	4,7	1,5		6,1	4,6	1,5
Изв.	V-1-2	20,8	10,4	2,0	V-2-2	26,8	20,0	3,8	V-3-2	22,8	14,0	2,8	V-4-2	40,0	20,0	4,0
Песч.		9,0	5,7	1,7		10,5	8,4	2,3		8,4	7,6	2,1		10,7	7,4	2,1
Изв.	V-1-3	13,0	6,5	1,3	V-2-3	16,0	12,5	2,5	V-3-3	14,3	8,8	1,8	V-4-3	25,0	12,5	2,6
Песч.		4,3	2,7	1,1		4,5	4,0	1,4		4,3	3,0	1,2		5,0	3,2	1,3
Изв.	VI-1-1	8,0	4,0	1,6	VI-2-1	10,9	3,7	1,5	VI-3-1	8,2	3,4	1,4	VI-4-1	10,0	4,5	1,7
Песч.		5,2	3,8	1,2		5,4	5,2	1,5		5,2	4,0	1,3		6,2	5,0	1,4
Изв.	VI-1-2	32,0	16,0	3,0	VI-2-2	43,6	14,0	3,0	VI-3-2	32,8	13,6	2,8	VI-4-2	40,0	18,0	3,4
Песч.		9,0	5,7	1,7		9,5	8,0	2,1		9,0	6,3	1,8		10,5	6,7	2,0
Изв.	VI-1-3	20,0	10,0	2,0	VI-2-3	27,3	9,3	2,0	VI-3-3	20,5	8,5	1,8	VI-4-3	25,0	11,3	2,2
Песч.	VII-1-1	3,3	2,1	0,6	VII-2-1	3,8	3,0	0,6	VII-3-1	3,9	2,1	1,0	VII-4-1	4,0	3,1	1,1
Изв.	1	3,2	2,0	0,8	1	3,2	3,0	2,0	1	5,0	4,0	1,5	1	6,0	4,0	1,5
Песч.	VII-1-2	4,0	2,9	0,7	VII-2-2	4,6	4,0	0,7	VII-3-2	4,7	2,9	1,1	VII-4-2	4,8	4,2	1,2
Изв.	2	12,8	8,0	1,5	2	12,8	12,0	3,5	2	20,0	12,0	3,0	2	24,0	16,0	3,0
Песч.	VII-1-3	6,9	4,4	0,9	VII-2-3	8,0	6,3	0,9	VII-3-3	8,2	4,4	1,5	VII-4-3	8,4	6,5	1,7
Изв.	3	8,0	5,0	1,0	3	8,0	7,5	2,4	3	12,5	10,0	2,0	3	15,0	10,0	2,0

Примечание. Геологические условия представлены сочетанием трёх цифр, из них первая отражает геоморфологические условия (7 вышеохарактеризованных элементов), вторая – структурный фактор (4 элемента), третья – наличие неогеновых врезов (3 элемента); уровни глубин: 1 – до 50 м, 2 – 50–100 м, 3 – 100–150 м; коэффициенты фильтрации, выделенные полужирным шрифтом, получены путем осреднения реальных значения водопроницаемости, показанные обычным шрифтом – на основе реальных и расчетных значений, курсивом – расчетные данные.

Нижнеказанские отложения в регионе формировались в широком диапазоне условий от морских нижнешельфовых до континентальных озерно-аллювиальных. При этом фациальные зоны характеризуются северо-западной ориентировкой [4, 5]. Морские отложения, обладающие более высокой водопроницаемостью, преимущественным развитием пользуются в пределах именно юго-восточного и западного склонов ЮТС.

Рассчитанные значения коэффициентов фильтрации пород-коллекторов нижнеказанского водоносного комплекса позволяют, в свою очередь, определить его водопроводимость по разрезам скважин, не сопровождавшихся опытно-фильтрационными опробованиями. Количество же таких скважин в несколько раз превышает количество гидрогеологических объектов, и они более равномерно распределены по территории Восточно-Закамского региона (рис. 4). При оценке водопроводимости принималось, что водовмещающими являются лишь песчаники и известняки с доломитами, а степень их обводнения или глубина расположения зоны полного водонасыщения определялась по сопоставлению с близрасположенными скважинами с известным уровнем подземных вод, а также по реальной обстановке – гипсометрическому уровню ближайших родников, уровню поверхностных водотоков (последний обычно принимался за наиболее низкий уровень подземных вод в скважинах, не сопровождавшихся гидрогеологическими наблюдениями). Данные по водопроводимости нижнеказанского комплекса, выявленные как в результате проведения опытно-фильтрационных опробований, так и расчетным путем, дополненные установленными закономерностями пространственной изменчивости фильтрационной способности пород, наиболее корректно отражают площадной характер поведения этого важнейшего параметра (рис. 7).

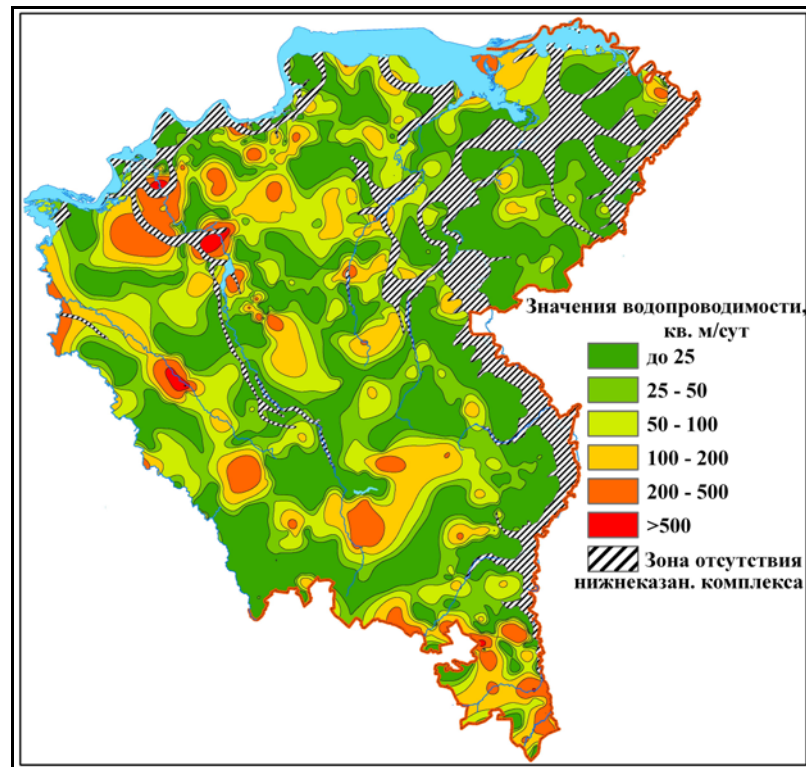


Рис. 7. Карта водопроводимости нижнеказанского водоносного комплекса в Восточно-Закамском регионе Татарстана

Данная карта водопроводимости была использована для оценки ресурсного потенциала подземных вод нижнеказанского водоносного комплекса и вариации модулей его стока. Естественные ресурсы, как известно, представляют собой обеспеченный питанием приток подземных вод, равный количеству воды, поступающей в единицу времени в какой-либо элемент гидрогеосферы в естественных условиях [3, 11]. По существу эти ресурсы представляют собой сумму приходных элементов водного баланса, среднееголетнее значение которой тождественно расходным элементам водного баланса. А основной объем разгрузки нижнеказанского водоносного комплекса в Восточном Закамье Татарстана приходится на родниковый сток и фильтрацию в палео- и современные речные долины. Разгрузка (расход) в эти долины определяется по закону А. Дарси:

$$Q = T * B * I,$$

где Q – величина расхода ($\text{м}^3/\text{сут}$), T – водопроводимость в зонах разгрузки ($\text{м}^2/\text{сут}$), B – длина зон разгрузки (м), I – напорный градиент.

Выявление расходов нижнеказанского комплекса наиболее удобно проводить по отдельным водосборным бассейнам – структурам, представляющим собой достаточно изолированные в балансовом отношении гидрогеодинамические системы. Границами этих систем являются линии поверхностных водоразделов, которые в Восточно-Закамском регионе в подавляющем большинстве случаев являются и водоразделами подземных вод

нижнеказанских отложений, и речные долины – зоны основной разгрузки. При анализе ресурсного потенциала нижнеказанского комплекса вся рассматриваемая территория была поделена на 71 водосборный бассейн (рис. 8). Бассейновый подход позволяет, как локализовать расход подземных вод и судить о его площадной изменчивости, так и визуализировать вариации модулей подземного стока и подземных массопотоков растворенных веществ. Данные модули рассчитываются следующим образом [3, 7]:

$$q_{n.c.} = Q / F \quad \text{и} \quad q_{p.в.} = Q * M / F,$$

где $q_{n.c.}$ – модуль подземного стока (л/с*км²), $q_{p.в.}$ – модуль подземного массопотока растворенных в воде веществ (г/с*км²), Q – расход нижнеказанского комплекса (л/с), F – величина водосборной площади (км²), M – минерализация подземных вод (г/л), $Q*M$ – количество растворенного вещества, выносимого фильтрационным потоком (г/с).

Минерализация подземных вод нижнеказанского комплекса “снималась” с гидрогеохимической карты, упрощенный вариант которой представлен на рисунке 9, а напорные градиенты – с карты гидроизопъез нижнеказанского комплекса, построенной по замерам уровней подземных вод в периоды летней межени. Гидрогеохимическая неоднородность этого водоносного комплекса обуславливает целесообразность выделения трех групп водосборных бассейнов, отличающихся природно-техногенными условиями (табл. 4).



Рис. 8. Карта водосборных бассейнов Восточного Закамья Татарстана:
1 – границы бассейнов, 2 – контуры крупных нефтяных месторождений

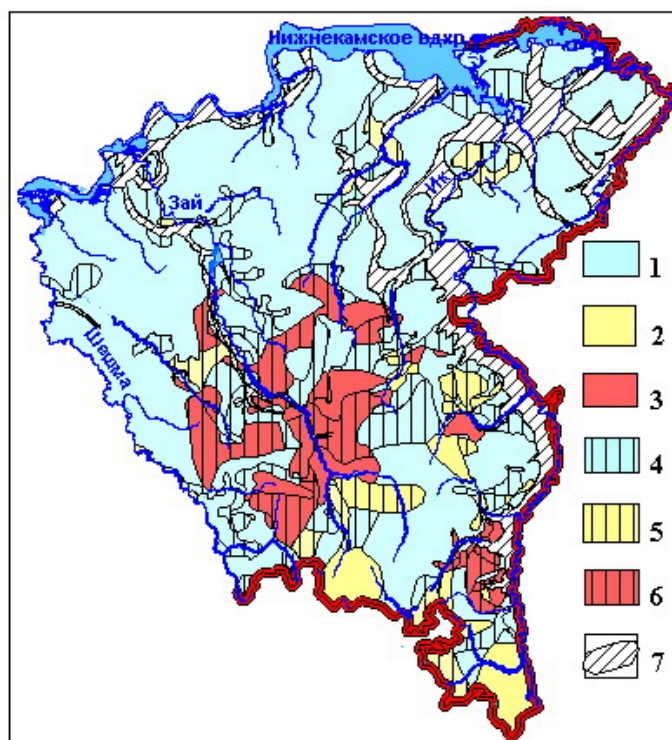


Рис. 9. Схематическая гидрогеохимическая карта нижнеказанского водоносного комплекса в Восточно-Закамском регионе Татарстана [8]:

1-6 – типы воды по анионному составу: 1 – гидрокарбонатный, 2 – сульфатный, 3 – хлоридный; 4-6 – смешанный: 4 – с преобладанием гидрокарбонат-иона, 5 – с преобладанием сульфат-иона, 6 – с преобладанием хлор-иона; 7 – зоны отсутствия нижнеказанского комплекса; зоны развития хлоридных вод контролируются контурами интенсивно разрабатываемых крупных нефтяных месторождений, а зоны распространения сульфатных вод отражают наличие в разрезе гипса

Таблица 4

Естественные ресурсы и модульные характеристики стока нижнеказанского водоносного комплекса в Восточно-Закамском регионе

Параметры	Части Восточно-Закамского региона Татарстана			
	регион в целом	районы крупных нефт. месторождений	районы незагипсован. разрезов вне нефт. месторождений	районы загипсован. разрезов вне нефт. месторождений
Кол-во водосб. бассейнов	71	34	28	9
Площадь, км ²	17421,4	6261,6	8913,7	2246,1
Длина зон разгрузки, км	2416,9	956,1	1231,9	228,9
Средневзвешенная минерализация подз. вод в зонах разгрузки, г/л	<u>0,4-2,6</u> 0,68	<u>0,4-1,73</u> 0,8-1,0	<u>0,4-0,82</u> 0,4-0,6	<u>0,4-2,6</u> 0,8-1,2
Расход, тыс. м ³ /сут	2141,0	582,4	1408,7	149,9
Модули подземного стока, л/с*км ²	<u>0,13-5,95</u> 1,42	<u>0,13-5,75</u> 1,08	<u>0,39-5,95</u> 1,83	<u>0,33-1,05</u> 0,77
Кол-во в-ва, выносимого фильтрац. потоками, т/сут	1292,25	463,13	654,3	174,82
Модули подз. массопотоков растворен. в-в, г/с*км ²	<u>0,09-2,71</u> 0,91	<u>0,09-2,57</u> 0,89	<u>0,16-2,71</u> 0,95	<u>0,18-1,66</u> 0,82

Примечание. Числовые характеристики, представленные в виде дроби, отражают: в числителе – пределы колебаний, в знаменателе – средневзвешенные или преобладающие значения; величины расходов и модулей являются минимальными, т.к. не учитывался родниковый сток.

Минимальная величина естественных ресурсов нижеказанского водоносного комплекса в изученном регионе составляет $2141000 \text{ м}^3/\text{сут}$ ($24,8 \text{ м}^3/\text{с}$), что сопоставимо со среднегодовым расходом р. Шешма – $21,6 \text{ м}^3/\text{с}$ [6], ограничивающей с запада Восточное Закамье РТ. Средневзвешенная величина модуля подземного стока в палео- и современные речные долины – $1,42 \text{ л/с*км}^2$, а модуль стока в современные долины составляет – $1,29 \text{ л/с*км}^2$. Последняя величина хорошо сопоставляется с нормой подземного питания рек Восточно-Закамского региона, которая по данным площадных гидрометрических работ 1990-х гг. оценивается в $1,32 \text{ л/с*км}^2$ (Кузнецов и др., 2002).

Распределение модулей подземного стока (рис. 10) в первую очередь определяется вариациями гипсометрического положения и фильтрационной способности пород нижеказанского комплекса. Низкие их значения (до 1 л/с*км^2) проявлены, в основном, в области приподнятого залегания водоносного комплекса, где он большей частью сдренирован (центральная и восточная части региона), и на участках, где его образования ещё не вскрыты (западная и крайняя юго-восточная части), а также в области пониженных значений водопроницаемости пород-коллекторов (северо-восточная часть Восточного Закамья). Максимальные же величины этих модулей (более 3 л/с*км^2) фиксируются в зоне сочленения сводовой части ЮТС с его западным склоном, где нижеказанские образования характеризуются повышенной трещиноватостью. Карта модулей подземного стока наглядно отражает значительный ресурсный потенциал нижеказанского водоносного комплекса и высокую вероятность выявления новых достаточно крупных месторождений питьевых подземных вод в западной части рассматриваемого региона, в области распространения гидрокарбонатных вод.

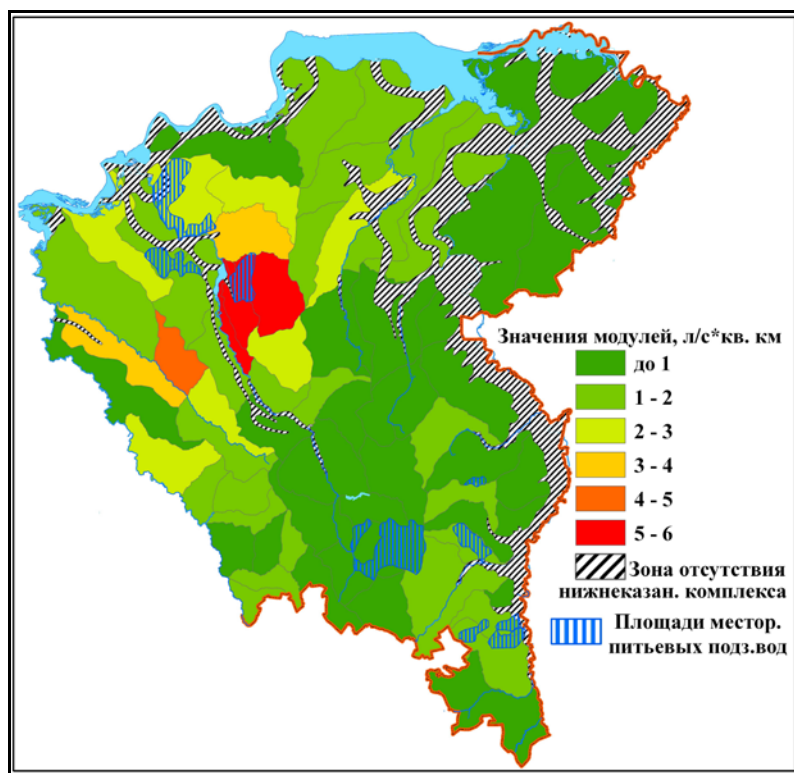


Рис. 10. Карта распределения по водосборным бассейнам модулей стока нижеказанского водоносного комплекса

Распределение модулей подземных массопотоков растворенных веществ (рис. 11) определяется флуктуациями модулей подземного стока и минерализации подземных вод, которые друг с другом не взаимосвязаны. Так, площади нефтяных месторождений, отличающиеся с одной стороны – повышенным фоном минерализации, а с другой – значительной сдренированностью нижеказанского комплекса, характеризуются сравнительно невысокими (до $1,5 \text{ г/с*км}^2$) величинами данного показателя.

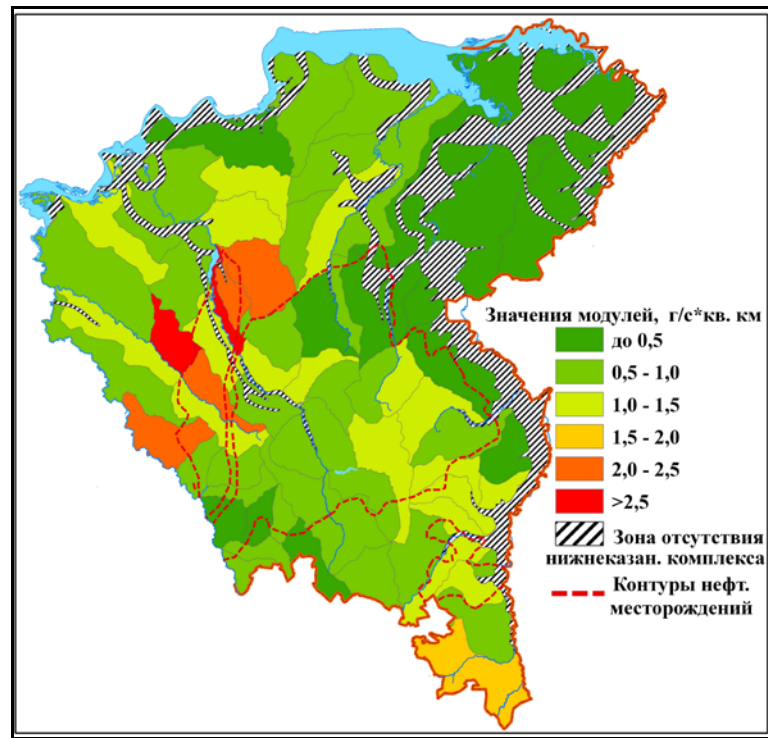


Рис. 11. Карта распределения по водосборным бассейнам модулей подземных массопотоков растворенных веществ нижеказанского водоносного комплекса

Полученные результаты по особенностям поведения фильтрационного поля нижеказанского комплекса позволяют:

- оптимально располагать новые водозаборные скважины и рационально планировать проведение поисково-разведочных работ на питьевые подземные воды;
- иметь первичный материал для исследований, ориентированных на: организацию полигонов складирования разнотипных отходов, выделение зон санитарной охраны водопроявлений, формирование численных геофильтрационных моделей, проведение гидродинамических расчетов распространения реального или потенциального загрязнения;
- уточнить величину эксплуатационных ресурсов подземных вод питьевого качества, основной объем которых сосредоточен в западной и северной частях региона, вне пределов крупных нефтяных объектов;
- детализировать структуру водного баланса региона, так рассчитанный средний модуль подземного стока для нижеказанского комплекса соответствует слою стока 44,7 мм/год, что от среднегодового количества атмосферных осадков в 500 мм/год [6] составляет 8,9 %;
- дополнительно подчеркнуть масштабность геологической деятельности подземных вод, так при ежесуточном выносе растворенного в них вещества массой 1292,25 т (питание нижеказанского комплекса, как отмечалось, – за счет инфильтрации

атмосферных осадков, имеющих минерализацию, преимущественно, 20-30 мг/л [6], и перетекания из перекрывающих отложений, восполнение запасов которых – также за счет атмосферных осадков), площади развития рассматриваемого водоносного комплекса – $17421,4 \cdot 10^6$ м², плотности выщелачиваемых пород – 2,5 г/см³, для снижения земной поверхности на 10 м, при условии проявления лишь деятельности подземных вод нижеказанского водоносного комплекса, потребуется всего 0,9 млн. лет [9].

Кроме этого, полученные данные по фильтрационной анизотропии нижеказанского комплекса можно перенести и на другие гидростратиграфические подразделения зоны активного водообмена как нефтяного региона Татарстана, так и соседних областей, характеризующихся сходным геологическим строением.

Работа выполнена в рамках государственной программы повышения конкурентоспособности Казанского (Приволжского) федерального университета среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Литература

1. Белоусов В. В. Основы геотектоники. 2-е изд., перераб. и доп.. М.: Недра, 1989. 382 с.
2. Войтович Е. Д., Гатиятуллин Н. С. Тектоника Татарстана. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1998. 140 с.
3. Всеволожский В. А. Основы гидрогеологии: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 2007. 448 с.
4. Геологические памятники природы Республики Татарстан / под ред. И. А. Ларочкиной; науч. ред. В. В. Силантьев. Казань: Акварель-Арт, 2007. 296 с.
5. Геология Татарстана: Стратиграфия и тектоника / Под ред. Б.В. Булова. М.: ГЕОС, 2003. 402 с.
6. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2005 г. / научн. ред. Н. П. Торсуев. Казань, 2006. 494 с.
7. Зверев В. П. Массопотоки подземной гидросферы. М.: Наука, 1999. 97 с.
8. Мусин Р.Х. Гидрогеоэкологические проблемы нефтегазового комплекса Татарстана //Техногенные процессы в гидrolитосфере (идентификация, диагностика, прогноз, управление): Национальный научный форум "Нарзан-2011" 25.09.2011 - 28.09.2011 г. Кисловодск. Сборник докладов. Пятигорск: РИА-КМВ, 2011. С. 113-125.

9. Мусин Р. Х., Зайнуллин А. Р. Оценка ресурсов и масштаба геологической деятельности пресных подземных вод в нефтяном регионе Татарстана // Ресурсы подземных вод: Современные проблемы изучения и использования. М.: МАКС Пресс, 2010. С. 242-247.
10. Сводная геологическая карта доплейстоценовых отложений Республики Татарстан масштаба 1:200000. Пояснительная записка. Казань: Изд-во “Арника”, 1997. 118 с.
11. Справочное руководство гидрогеолога. 3-е изд., перераб. и доп. / Под ред. В. М. Максимова. В 2 т. Л.: Недра, 1979. Т. 1. 512 с.