Записки Ленинградского горного института имени Г.В.Плеханова.
Т. 123. Л., 1991

УДК 551:49

Т.В.САЛГАНОВА

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ СЕВЕРОДВИНСКОЙ ВПАДИНЫ

Северодвинская впадина расположена в низовьях Северной Двины и представляет собой крупную эрозионную депрессию, погружающуюся в сторону Белого моря и выходящую на шельф. Абсолютные отметки днища впадины уменьшаются от -35 м в районе Усть-Пинеги до -76 м на морском побережье. Абсолютные отметки земной поверхности в пределах впадины в среднем составляют 10-20 м. Общая протяженность структуры 120 км, ширина поверху 100-110 км, по днищу 30-40 км. Западный пологий склон впадины (Двинский уступ) имеет уклон 2-3°. Высота уступа в устье реки 20-30 м, к югу он выполаживается и в рельефе почти не выражен. Впадина заполнена слабопроницаемыми четвертичными осадками: дно выстилают суглинки московской морены (10-15 м), на них залегают бореальные глины микулинской трансгрессии мощностью 50-70 м. Долина реки, прорезающая толщу четвертичных глин почти до подошвы, приблизительно совпадает с тальвегом впадины (рис.1, 2). Ширина ее изменяется от 15 км в дельте до 2 км в самой узкой части. Аллювиальные и аллювиально-морские отложения долины представлены песчано-глинистыми осадками верхнечетвертичного и современного возраста.

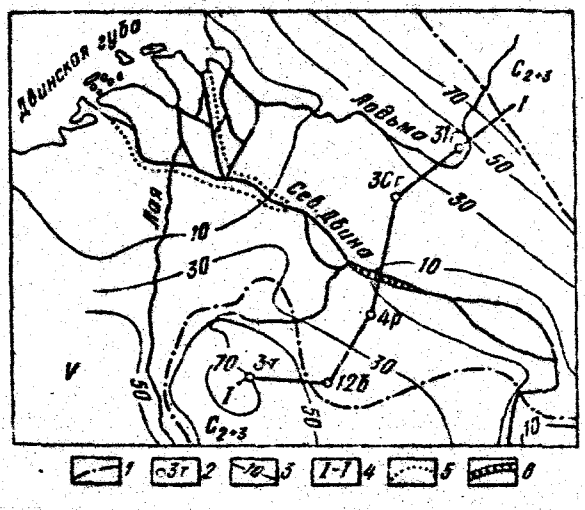


Рис.1. Гидрогеологическая схема Северодвинской впадины
1 - границы водоносных комплексов; 2 - скважина и ее номер; 3 - гидроизогипсы (гидроизопьезы); 4 - линия разреза; 5 - границы "языка" морской воды; 6 - участок разгрузки вендского водоносного комплекса

Низкое гипсометрическое положение и структурные особенности территории предопределили формирование на площади Северодвинской впадины крупного очага разгрузки артезианских вод; близость к морю создала предпосылки для внедрения в водоносные гори-

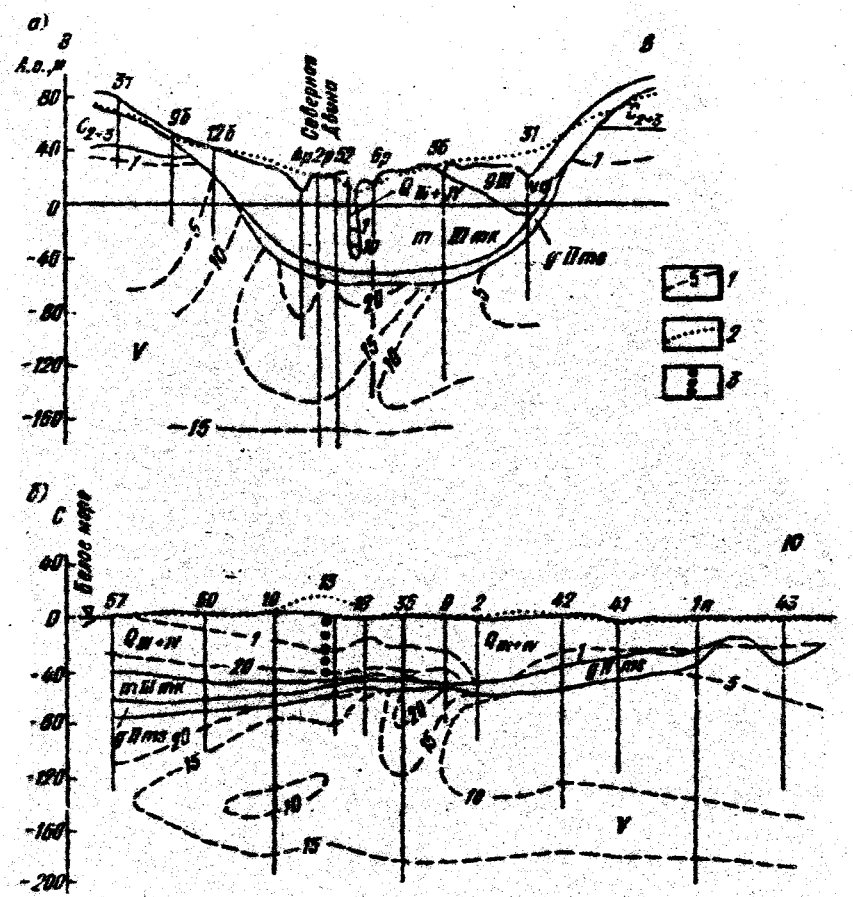


Рис.2. Схематические гидрогеологические разрезы Северодвинской впадины (с изолиниями минерализации): а – запад-восток; б – север-юг
1 – изолинии минерализации; 2 – пьезометрический уровень в вендском водоносном комплексе; 3 – граница "языка" морских вод

зоны современной морской воды; обилие погребенных слаборазложившихся органических остатков в толще четвертичных глин обусловило интенсивное протекание окислительно-восстановительных процессов (при активном участии микроорганизмов).

В разрезе Северодвинской впадины выделяют два гидрогеологических этажа, разделенные региональным водоупором. Нижний гидрогеологический этаж включает водоносный горизонт коры выветривания архейского кристаллического фундамента и залегающий на его снивелированной поверхности водоносный горизонт тамицких песчаников и гравелитов устьпинежской свиты венда (мощностью от 1,5 до 26 м). Верхний гидрогеологический этаж включает водоносные комплексы терригенных отложений вендского и четвертичного возраста общей мощностью от 200 до 500 м.

В нижнем гидрогеологическом этаже на глубинах от 663 до 825 м вскрыты рассолы с минерализацией от 88 до 170 г/л хлоридного кальциево-натриевого состава. Относительное содержание хлор-иона составляет не менее 98 экв.% соответственно Na^+, Ca^{2+} и Mg^{2+} 60–80, 15–27 и 5–10 экв. %, значения хлорбромного коэффициента изменяются от 200 до 700; воды имеют слабокислую реакцию (pH = 5,6÷5,8); в отдельных скважинах отмечено повышенное содержание йода (до 16 мг/л). По своему генезису это древние седиментогенные воды, представляющие собой метаморфизованную рапу пермских соленосных бассейнов, частично разбавленную инфильтрогенными водами. Повышенные в ряде случаев значения хлорбромного коэффициента при соответствующем уменьшении доли кальция (rNa/rCl стремится к единице) свидетельствуют о применивании рассолов выщелачивания.

Верхний гидрогеологический этаж отделен от нижнего толщей глин и аргиллитов вендского возраста (региональный водоупор), мощность которой увеличивается в направлении погружения слоев от 200 м на побережье Белого моря до 400–500 м в южной части впадины. Напоры в водоносных горизонтах верхнего этажа растут с глубиной и в среднем на 25–30 м ниже, чем в нижнем, что обусловливает возможность скрытой разгрузки рассолов, залегающих ниже регионального водоупора. Разгрузка напорных вод верхнего этажа осуществляется в нижнем течении Северной Двины, где толща четвертичных глин почти до подошвы прорезана долиной реки. Зона пьезоминимумов, оконтуренная изопьезой +10 м, имеет форму языка, направленного от берега моря вверх по течению реки (см. рис.1) Большинство скважин, вскрывших водоносные горизонты венда в пределах участка разгрузки, самоизливает; высота излива достигает 10–11 м.

Своеобразие гидродинамических условий в дельте реки предопределило чрезвычайно сложную гидрогеохимическую обстановку в водоносных комплексах верхнего гидрогеологического этажа; одной из ее характерных особенностей является существование гидрохимической инверсии в верхней 100–150-метровой части разреза венда, выражающейся в уменьшении книзу минерализации подземных вод хлоридного натриевого и кальциево-натриевого состава от 18–27 до 5–10 г/л при соответствующем снижении концентрации йода от 20–30 мг/л до следов (рис.3, 4). Зона инверсии тяготеет к центральной части впадины, где мощность толщи микулинских глин достигает 70–80 м (см. рис.2). Вертикальная гидрохимическая зональность и зональность состава ионно-солевого комплекса вмещающих пород имеют свои индивидуальные черты для центральной и прибортовых частей Северодвинской впадины.

Графическая обработка результатов гидрогеохимического опробования вендского водоносного комплекса в зоне инверсии (см. рис.3) выявила следующее:

1) хлор, бром, йод, натрий и магний имеют общий источник происхождения – солевые воды четвертичных трансгрессий; наиболее вероятен диффузионный механизм их распределения в зоне инверсии;

2) относительное содержание магния в подземных водах можно считать косвенным показателем их возраста: в молодых водах четвертичных

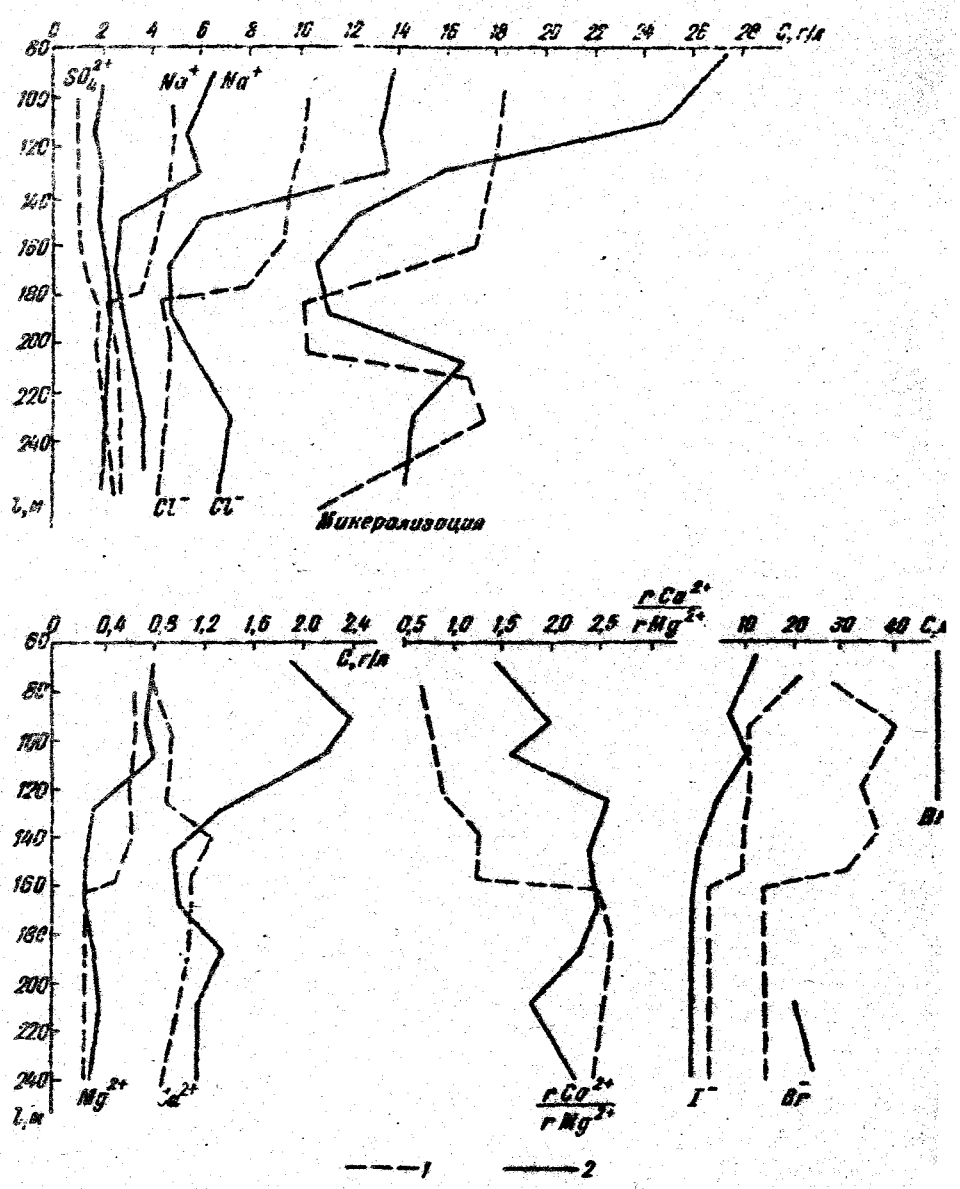


Рис.3. Изменение минерализации, концентраций Mg^{2+}, Na^+, Ca^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, J^-, Br^- и отношения rCa^{2+}/rMg^{2+} с глубиной
1 и 2 – в скважинах 2 и 5 соответственно; l – глубина

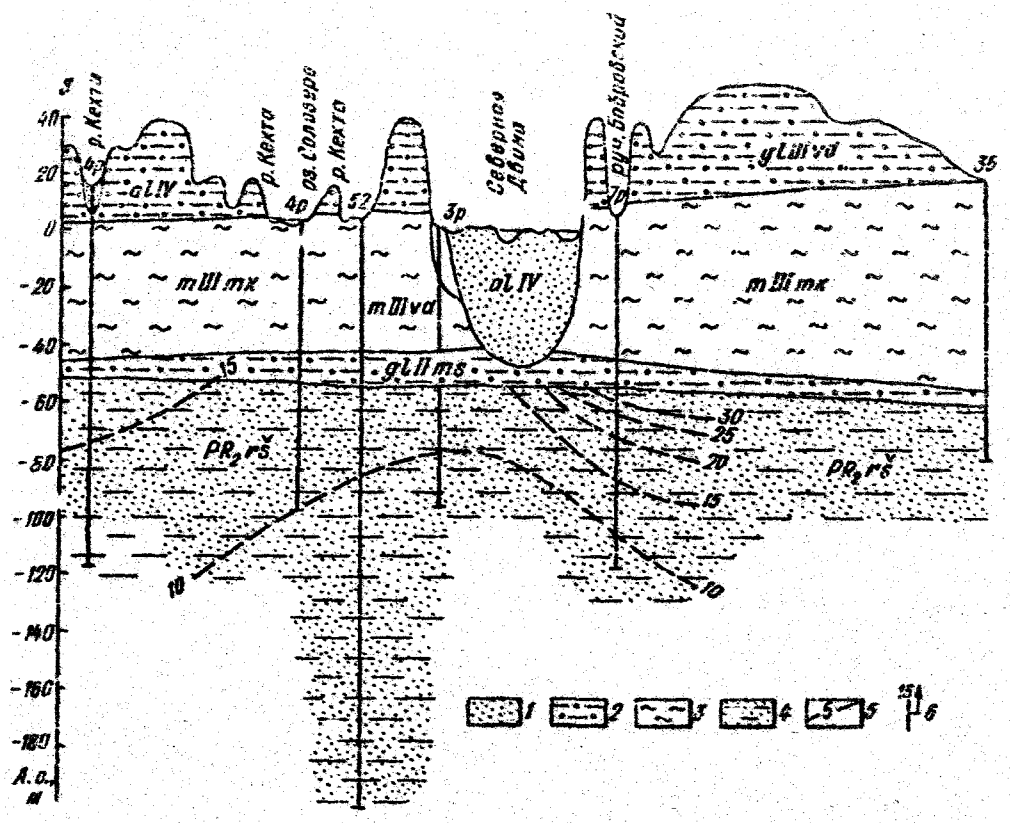


Рис.4. Схематический гидрогеологический разрез Северодвинской впадины (с изолиниями концентрации йода)

1 – песок; 2 – суглинок валунный; 3 – глина; 4 – пески, песчаники, алевролиты с прослоями ангидритов; 5 – изолинии концентрации йода; 6 – скважина, ее номер и положение пьезометрического уровня относительно земной поверхности

трансгрессий оно такое же, что в современной морской воде (15–18 экв.%); в древних седиментационных водах оно снижается до 8–11 экв.%, следовательно, увеличение с глубиной отношения rCa^{2+}/rMg^{2+} от 0,3–1,5 до 2–3 свидетельствует о постепенной смене в разрезе морских вод четвертичных трансгрессий древними седиментационными;

3) большой разброс концентраций сульфатного и гидрокарбонатного ионов в верхней части разреза венда – результат активного протекания процессов биохимической сульфатредукции, особенно ярко проявляющейся на контакте с богатыми органическим веществом мякулинскими глинами;

4) ниже с глубин 160–210 м, химический состав подземных вод выравнивается и соответствует гидрохимической зональности, характерной для всего Северодвинского артезианского бассейна и выражающейся в постепенном нарастании минерализации книзу;

5) устойчивое ниже этих глубин содержание сульфат-иона (2–2,3 г/л), близкое к насыщению минерализованных вод сульфатом кальция, и химический

состав водных вытяжек свидетельствует о том, что главным источником сульфатов в подземной воде является гипс;

6) в результате диффузионных процессов химический состав подземных вод гидравлически разобщенных вендского и четвертичного водоносных комплексов тесно взаимосвязан;

7) единственно возможным источником йода является толща мамонтовских глин, насыщенных остатками йодосодержащих водорослей;

8) в трехслойном гидрохимическом разрезе вендского водоносного комплекса прослеживаются две подзоны хлоркальциевых вод: верхняя, формирующаяся при совместном протекании процессов выщелачивания гипсовых включений и биохимической сульфатредукции, и нижняя, связанная с процессами длительной метаморфизации седиментогенных вод; затуханием биохимических процессов в нижней подзоне обусловлено пятикратное снижение концентрации гидрокарбонат-иона;

9) увеличение возраста подземных вод с глубиной контролируется повышением на два порядка концентраций гелия в составе растворенных и слоистых газов;

10) близкий к рассолам нижнего гидрогеологического этажа катионный состав подземных вод, характеризующийся высокой долей кальция (около 25 экв.%), может рассматриваться как косвенное подтверждение перетока рассолов из глубоких горизонтов по зонам тектонических нарушений.

Вертикальная гидрохимическая зональность прибортовых частей Северодвинской впадины существенно отличается от зональности, наблюдаемой в ее центре, в зоне инверсии. Наиболее детально изучен гидрохимический разрез юго-западной окраины впадины, где подземные воды опробованы на всю мощность разреза осадочного чехла. В 700-метровой толще терригенных пород венда в соответствии со спецификой формирования химического состава подземных вод выделяются три интервала.

В верхней части разреза (глубина 80–120 м) развиты соленые воды сульфатно-хлоридного натриевого состава с минерализацией 6,2–8,9 г/л и характерным значением хлор-бромного коэффициента 300–330. Анионы на 60–65 экв.% представлены хлоридами, на 30–32 экв.% сульфатами и на 5 экв.% гидрокарбонатами. В катионном составе преобладает натрий (65–69 экв.%), соотношение $r Ca^{2+}/r Mg^{2+}$ близко к единице (15–18 экв.% и 13–16 экв.% Mg^{2+}), а в отдельных случаях снижается до 0,6. Характерной особенностью вод верхнего интервала является заметное превышение (почти вдвое) сульфатов над кальцием и относительно высокое (300–430 мг/л) содержание гидрокарбонат-иона. По своему генезису воды верхнего интервала седиментационные, разбавленные пресными водами, поступающими с бортов Северодвинской впадины и обогащенные сульфатами в результате выщелачивания гипсовых примесей из вмещающих пород. При взаимодействии минерализованных вод с глинистыми породами с «морским» типом обменного комплекса происходит замещение Mg^{2+} и Na^{+} пород на Ca^{2+} раствора и формирование сульфатно-натриевого (по Сулину) типа вод; наряду с этим активно протекают процессы выщелачивания карбонатных примесей, в результате которых вода насыщается $Ca(HCO_3)_2$.

В среднем интервале (200–300 м) минерализация воды растет до 11,4–13 г/л; ее состав – хлоридный кальциево-натриевый, величина хлорбромного коэффициента 260–280. Доля хлоридов увеличивается до 76–81 экв.%, сульфатов уменьшается до 18–23 экв.% (последнее обусловлено постоянством концентрации сульфатов в воде верхнего и среднего интервалов при различии минерализаций).

В катионном составе доля кальция достигает 21–25 экв.%, магния уменьшается до 10–11 экв.%, натрия остается прежней (64–69 экв.%). Меняется эквивалентное соотношение кальция и сульфатов: кальций преобладает. Концентрация гидрокарбонат-иона падает до 50–70 мг/л (0,5–1 экв.%). По соотношению основных компонентов и величине хлорбромного коэффициента воды среднего интервала – седиментогенные. Избыток кальция над сульфатами – результат более древних процессов метаморфизации первичной морской воды. Высокие концентрации кальция в воде резко подавляют процесс выщелачивания карбонатных минералов (действие одноименного иона).

В нижнем интервале, соответствующем нижнему гидрогеологическому этажу, на глубине 680–700 м содержатся седиментационные (иногда с примесью вод выщелачивания) хлоридные кальциево-натриевые рассолы с минерализацией от 66 до 170 г/л и хлорбромным отношением от 280 до 700. Анионный состав на 98–99 экв.% представлен хлоридами, соотношение катионов приблизительно то же, что в водах среднего интервала, экв.%: Na^+ 60–62, Ca^{2+} 21–26, Mg^{2+} 10–12. Близость катионного состава может свидетельствовать о перетоке рассолов нижнего интервала в вышележащие водоносные комплексы.

Характерным отличием вод нижнего интервала является снижение концентрации сульфатов до 0,7 г/л и гидрокарбонатов до 20–30 мг/л, а также уменьшение pH до 5,65 по сравнению с 7,2–7,5 в верхнем и среднем интервалах. Уменьшение содержания сульфатов при их относительно неизменном (как показали результаты водных вытяжек) содержании в породах по всему разрезу венда может быть объяснено только процессами сульфатредукции. Восстановление сульфатов должно было бы сопровождаться ростом концентрации гидрокарбонат-иона, однако, одновременно протекает характерный для больших глубин процесс вытеснения катионами рассола иона водорода, входящего в кристаллическую решетку глинистых минералов, приводящий к снижению pH и соответственно концентрации гидрокарбонат-иона.

В составе растворенных в подземных водах газов в толще венда также прослеживается гидрогеохимическая зональность. Содержание гелия вниз по разрезу возрастает с 0,02 до 0,78–1,548 % по объему, гелий-аргоновый коэффициент в водах нижнего интервала достигает высокой величины (1,67), что свидетельствует об уменьшении интенсивности водообмена и увеличении возраста подземных вод с глубиной.

Четвертичный водоносный комплекс на площади Северодвинской впадины содержит воды пестрого химического состава с минерализацией от десятых долей до 27 г/л, часто насыщенные биогенными газами (главным образом, метаном), с повышенным содержанием специфических компонентов: йода, брома, железа, сероводорода. Мощность зоны пресных вод редко превышает 10–25 м.

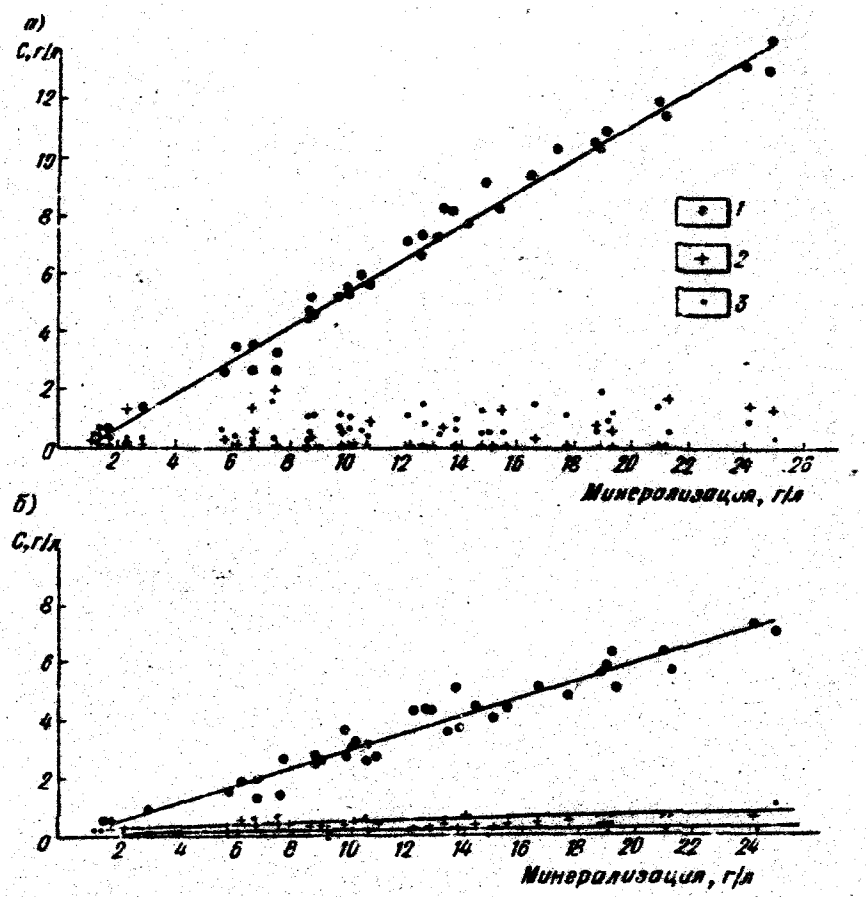


Рис.5. Миграционные кривые для водоносного комплекса четвертичных отложений: а и б – концентрация анионов и катионов соответственно
1 – Cl^-, $Na^+ + K^+$; 2 – SO_4^{2-}, Mg^{2+}; 3 – HCO_3^-, Ca^{2+}.

Поверхность раздела пресных и соленых вод имеет сложный характер; в целом она понижается к бортам впадины (см. рис.2). Содержание хлора, магния и натрия в водах с минерализацией более 5 г/л изменяется прямо пропорционально величине минерализации (рис.5). Для кальция, гидрокарбонатного и сульфатного ионов во всем диапазоне изменения минерализации наблюдается сильный разброс значений концентрации, особенно для двух последних (от нескольких десятков миллиграммов на литр до 2 г/л).

В водоносных горизонтах четвертичных отложений выделено три генетических типа подземных вод. Воды первого типа – пресные, преимущественно гидрокарбонатного магниево-кальциевого состава, с минерализацией 0,3–0,5 г/л и несколько повышенным содержанием хлор-иона (20–40 мг/л) – залегают в верхней части разреза четвертичной толщи. Повышенный фон по хлору связан с влиянием „языка" соленых вод, затекающих из Белого моря,

и подтоком минерализованных вод из отложений венда. Для вод данного типа характерны высокие, до 840 мг/л, концентрации гидрокарбонатов (при средних значениях 260–360 мг/л), неустойчивое содержание сульфат-иона (от 0 до 40 мг/л, обычно 8–10 мг/л), повсеместное присутствие железа, содержание которого в среднем составляет 10–30 мг/л, и в небольших количествах аммония (несколько миллиграммов на литр, редко 10–20 мг/л). Окислительно-восстановительный потенциал изменяется в незначительных пределах: от 80 до 100 мВ.

Обращают на себя внимание очень высокие для железистых вод значения pH = 7,7÷8,3. Удержание железа в растворенной форме при таких pH обусловлено повышенным содержанием углекислоты (примерно 100–200 мг/л), образующейся при разложении органического вещества, в большом количестве содержащегося в аллювиальных и аллювиально-морских осадках, а также образованием комплексных соединений железа с растворенными в воде фульво- и гуминовыми кислотами.

Во второй гидрохимический тип выделены соленые воды хлоридного натриевого состава с минерализацией от 8,3 до 20,3 г/л. К нему относятся современные морские воды, внедрившиеся в дельтовые отложения Северной Двины и метаморфизованные в результате взаимодействия с донными осадками, а также воды четвертичных трансгрессий, захороненные в прослоях и линзах песков микулинского возраста. Воды этого типа почти всегда бессульфатны (содержание сульфатов редко достигает нескольких десятков миллиграммов на литр) и содержат до 1–1,5 г гидрокарбонатов (в среднем 500–600 мг/л). Катионный состав тот же, что у современных морских вод. Как и пресные воды первого типа, данные воды часто содержат высокие концентрации железа: до 40–70 мг/л. Отмечены высокие концентрации биогенных компонентов (йода до 25 мг/л, аммония до 50–90 мг/л). Скважины часто газируют, случаются выбросы бурового инструмента; выходы естественных газовых струй встречаются в бортах речных долин и по берегам озер. В составе биогенных газов преобладает метан, на долю которого приходится 88–90 % по объему; содержание прочих газов, %: $CO_2 + H_2$ 1–5, азот воздушный 5–10, азот биогенный до 1. Высокие значения окисляемости (часто более 100 мг/л кислорода) свидетельствуют о большом количестве растворенного органического вещества. Химический состав вод данного типа своеобразен: отсутствие сульфатов, повышенное содержание биогенных компонентов и газов являются результатом биохимических процессов, активно протекающих при взаимодействии минерализованных вод с обогащенными органическим веществом четвертичными осадками ($C_{орг}$ в них в среднем составляет 10 %). Застойный режим грунтовых вод в дельте реки способствует формированию среды, благоприятной для развития различных форм анаэробных микроорганизмов, осуществляющих деструкцию погребенного органического материала. С продуцированием угольной и других биогенных кислот в процессе разложения органического вещества связаны, очевидно, и повышенные концентрации кремнезема (до 60 мг/л против 5–15 мг/л в отложениях венда), образующегося при выщелачивании алюмосиликатов.

Воды третьего типа с минерализацией от 8,5 до 21,2 г/л встречены в южной части Северодвинской впадины на участке разгрузки артезианских вод и имеют сходный с ними химический состав. Это обычные седиментационные воды, частично измененные в процессе фильтрации через насыщенные органическим веществом четвертичные образования. От вод второго типа их отличает повсеместное присутствие большого количества сульфат-иона (I-I,7 г/л) и резкое увеличение доли кальция в катионном составе (II-I6 экв.% против 3-5 экв.% в водах второго типа) при неизменном относительном содержании магния (I5-I8 экв.%). Характерны высокие концентрации биогенных компонентов и железа, мг/л: NH_4^+ 7-I8; NO_2^- 2-4, NO_3^- до 8, J^- 5-8, Fe до 44. Особенности микрокомпонентного состава, а также высокие (400-600 мг/л) концентрации гидрокарбонатов при заметном снижении содержания сульфат-иона по сравнению с водами вендского комплекса (I,I-I, и 2-2,3 г/л) являются результатом биохимических процессов, протекавших в толще мякулинских глин. Главным фактором, мобилизующим железо в раствор, как и в рассмотренном выше случае, является биогенная углекислота.

Неполное, в отличие от второго типа вод, восстановление сульфатов свидетельствует о постоянном их возобновлении. Такое возобновление может осуществляться только седиментационными водами залегающих ниже вендских отложений. Таким образом, относительно высокое содержание сульфат-иона в водах третьего типа можно рассматривать как еще один косвенный показатель разгрузки минерализованных вод вендского водоносного комплекса. Существенное значение имеют гидродинамические условия в водоносном комплексе четвертичных отложений. Усиление водообмена, связанное с увеличением градиентов грунтового потока в южной части Северодвинской впадины, ухудшает условия сульфатредукции и снижает ее роль в преобразовании химического состава воды (о более активном, в сравнении с зоной „языка" морских вод, водообмене свидетельствует и наличие в водах данного типа окислов азота). Как видим, содержание сульфатов чутко реагирует на изменение гидродинамической обстановки, что в комплексе с другими признаками можно использовать при различных гидрогеологических интерпретациях.

Выводы

Главные отличительные особенности современной гидрогеохимической обстановки на площади Северодвинской впадины состоят в следующем:

I) скрытом характере разгрузки артезианских вод по тальвегу устьевой части долины Северной Двины;

2) инверсионной гидрогеохимической зональности в верхней I00-метровой части разреза вендского водоносного комплекса, обусловленной влиянием четвертичных трансгрессий, диффузией солей из толщи мякулинских глин и подтоком опресненных вод с бортов Северодвинской впадины;

3) сложной гидрогеохимической ситуации в четвертичном водоносном комплексе, где происходит взаимодействие трех потоков подземных вод различного генезиса: пресных инфильтрационных, современных морских, затем

щих из Белого моря, и разгружающихся седиментационных вод венд-ских отложений;

4) в окислительно-восстановительных процессах, приводящих к накоплению в подземных водах биогенных компонентов (CO_2, CH_4, NH_4^+, J^-) и железа, на контакте с обогащенной йодосодержащими органическими остатками толщей четвертичных глин.