

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ ОСВОЕНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Часть 1**

А.И. Малов¹, С.Б. Зыков¹, А.И. Поршневу^{1,2}, М.В. Гонтарев³

1 – Институт экологических проблем Севера УрО РАН, г. Архангельск;

2 – ОАО Севералмаз, г. Архангельск; 3 – САФУ им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск;
e-mail: malovai@yandex.ru

**Исследование радиоактивных систем и механизмов их фракционирования в
геологических структурах для прогнозирования состояния окружающей среды**

Задачами исследований в 2012–2013 гг. являлись:

- получение количественных характеристик радиоактивных систем геологических структур и техногенных объектов;
- анализ поведения радиоактивных систем в естественных условиях и при техногенных преобразованиях;
- разработка моделей гидрогенного концентрирования и рассеяния урана во впадинах зоны сочленения Балтийского щита и Мезенской синеклизы.

Объекты исследований:

- в качестве геологической структуры с преобладанием естественных условий выбрана неоген-четвертичная Северо-Двинская впадина – район Архангельского и Северодвинского месторождений минеральных вод и Северодвинского месторождения промышленных йодных вод;
- в качестве техногенного объекта определено разрабатываемое карьером глубиной 110 м месторождение алмазов им. М.В. Ломоносова – район развития неоген-четвертичных палеодолин на Беломорско-Кулойском плато.

Методы исследований. В процессе опробования пробы воды для определения ее химического состава фильтровали через фильтрующую насадку Миллекс d 33 мм, d пор 45 мм. Пробы на главные элементы и микроэлементы подкисляли 70% ОХЧ HNO_3 . Осаждение изотопов U из водных проб проводили на специально подготовленном активированном угле марки БАУ-А. Определения изотопов урана в подземных водах и горных породах производились в соответствии с унифицированными методиками ВИМС (Методика..., 1999а; Методика..., 1999б). Спектрометрическое детектирование альфа-частиц осуществляли с помощью альфа-спектрометра «Прогресс-альфа» с погрешностью 7–20%. Анализы макро- и микроэлементов в воде проводились в соответствии с

процедурами, описанными в (Vasyukova et al., 2010; Pokrovsky et al., 2010). Щелочность измерялась методом потенциометрического титрования соляной кислотой на автоматизированном титраторе (Metrohm 716 DMS Titrino), используя Gran method с пределом обнаружения 10^{-5} М и неопределенностью 2%. Растворенный органический углерод (DOC) анализировали с помощью Carbon Total Analyzer (Shimadzu TOC 5000) с погрешностью не более 3%. Концентрации основных анионов (Cl, SO₄, F) были измерены методом ионной хроматографии (HPLC, Dionex ICS 2000) с погрешностью 2%. Концентрации кальция, магния, натрия и калия определяли с погрешностью 1–2%, используя Perkin-Elmer 5100 PC атомно-абсорбционный спектрометр (ААС). Микроэлементы были определены без предварительного концентрирования на ICP-MS (Agilent 7500). Корректировки оксид- и гидроксид-ионов были сделаны для редкоземельных элементов (РЗЭ) и металлов (Aries et al., 2000). Международный геостандарт SLRS-4 (Riverine Water Reference Material for Trace Metals certified by the National Research Council of Canada) был использован для проверки точности и воспроизводимости результатов каждого анализа (Yeghicheyan et al., 2001). Мы получили хорошее согласие между репликациями измерений SLRS-4 и сертифицированными значениями (относительная разница <10%). Определения pH, Eh, общей минерализации, O₂, CO₂, Fe выполнялись непосредственно на самоизливающихся, реже – эксплуатируемых скважинах и природных источниках подземных вод с использованием полевой экспресс-лаборатории. Для объектов исследований производились палеогеографические реконструкции, палеогидрогеологический анализ, термодинамическое моделирование равновесно-неравновесных условий в системе вода–порода.

Результаты исследований. Изучены основные факторы формирования радиоактивных вод и составлены модели концентрирования и гидрогенного перераспределения урана в природных и техногенных условиях.

Факторы формирования радиоактивных вод в водоносном комплексе алевритов и песчаников падунской свиты венда на территории Северо-Двинской впадины. Минимальные активности изотопов U преобладают в наиболее минерализованных водах (15–27 г/л), развитых под наиболее погруженными участками Северо-Двинской впадины, тяготеющими к ее тальвегу (рис. 1, 3). Для этих вод характерно снижение значений pH и Eh и содержаний гидрокарбонат-иона и повышенные концентрации Fe. Значения Eh ниже 100 мВ характеризуют близкие к восстановительным условия для U, вследствие чего

процесс его перехода в раствор заторможен. Минимальные содержания U в подземных водах сохраняются в основном благодаря радиационным процессам. Fe, напротив, переходит в раствор в восстановленной форме.

Несколько повышаются активности изотопов U в пресных водах, сформированных на бортах впадины, превышая предельно допустимые значения альфа-активности для питьевых вод. Эти воды характеризуются повышенными значениями pH (до 9), Eh (до 300 мВ), содержаний гидрокарбонат-иона, O₂, CO₂ и пониженными концентрациями Fe. Время их нахождения в водоносном горизонте – 1.6–16.3 тысяч лет; то есть их инфильтрация осуществлялась в процессе таяния последнего ледника и после его отступления.

Максимальные активности изотопов U характерны для зон внедрения пресных гидрокарбонатных вод в соленые, на фронте «зон пластового окисления», где минерализация воды составляет 5–10 г/л (рис. 3). Здесь значения Eh – до 300 мВ, pH ~ 7. Характерны минимальные содержания O₂ (0.5 мг/л) и CO₂ (10 мг/л), низкие содержания Fe. Намечается обратно-пропорциональная зависимость между содержаниями Fe и активностями изотопов U. Основными факторами формирования высоких концентраций U в водах этого типа являются максимальная для условий Северо-Двинской впадины продолжительность нахождения подземных вод в водоносном горизонте (порядка 130 тысяч лет) и наличие окислительных для U условий. Кроме того, равноценным по значимости фактором представляется наличие повышенных активностей урана в водовмещающих горных породах: до 180–260 Бк/кг, что соответствует их концентрациям порядка 15–20 мг/кг.

Модель концентрирования и гидрогенного перераспределения урана. В типовой геолого-гидрогеологической обстановке Северо-Двинской впадины, благоприятной для формирования радиоактивных подземных вод, повышенные активности урана характерны для зеленоцветных пород. Это связано с тем, что для концентрирования урана необходимы восстановительная щелочная среда, наличие в породах органики, а в растворе – сероводорода или водорода. Такие условия существовали на локальных участках в пределах верхней части разреза осадочных пород под Северо-Двинской впадиной в плиоцене – плейстоцене, когда после длительного континентального перерыва в течение всего мезозоя началось ее заполнение озерными и морскими отложениями, богатыми органикой. За счет размыва гипсово-карбонатных пород карбона – перми в подземных

водах поддерживались высокие содержания сульфат-иона. Поэтому активно протекали процессы сульфатредукции с продуцированием сероводорода. Это вело к существенному повышению щелочности среды за счет значительного роста содержания HCO_3^- . В результате под Северо-Двинской впадиной на восстановительных щелочных барьерах при участии сорбционных глинистых барьеров могли накапливаться определенные количества урана. Так как все это время в данном районе существовали условия аккумуляции, эти проявления, возможно, формировались на протяжении всего периода плиоцена – плейстоцена, то есть от 5 до 7 млн лет.

Для пород, развитых в пределах восстановительных барьеров, характерно восстановление окислов железа, в связи с чем красная окраска пород сменялась на зеленую. В период микулинского межледниковья Северо-Двинская впадина заполнялась морскими песчано-глинистыми осадками с высоким содержанием органики. Затем территория была закрыта валдайским ледником. После таяния валдайского ледника и образования эрозионной долины р. Северной Двины имеет место движение гидрокарбонатных вод с бортов впадины к долине реки. Карбонатсодержащие воды с $Eh +200 - +300$ мВ растворяют уран и переносят его в направлении движения. При значениях Eh ниже $+100$ мВ концентрации урана в растворе резко снижаются. В этих зонах можно ожидать максимальных скоплений урана в осадочных отложениях в форме окислов, частично – силикатов. Нами откартирована одна из подобных зон – по фронту максимальных активностей урана, перераспределяющегося к «гидрогеологическому окну» в водоупоре. Эта зона располагается в области, тяготеющей к тальвегу Северо-Двинской впадины. Здесь развиты наиболее минерализованные воды морского происхождения, не разбуженные пресными инфильтрационными. Повышенные концентрации урана в горных породах на территории неоген-четвертичной Северо-Двинской впадины характерны для скважин, наиболее близко располагающихся к откартированной зоне. На рис. 2 и 3 показано, что внутренний контур области максимальных активностей U приурочен к зоне разгрузки глубокозалегающих минерализованных подземных вод в вышележащие водоносные горизонты пресных вод.

Количественные характеристики уран-изотопной системы в подземных и поверхностных водах разрабатываемого карьером месторождения и модель поведения этой системы в условиях техногенного преобразования. В табл. 1 приведены данные по активностям изотопов урана в пробах воды, отобранных из водопонижительных скважин

(ВП и ВПС) карьера на трубке Архангельского месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова и из поверхностных вод р. Золотицы, в которую осуществляется сброс дренажных вод.

Таблица 1

Результаты измерений активностей изотопов U-238, U-234 (Бк/л) и общей минерализации (TDS) (мг/л) в подземных и поверхностных водах

Место отбора	Год	U-234/ U-238	U-238	U-234	TDS
Слив ВПС	2006	3,53	0,00342	0,01208	380
Скв. ВП24	2005	4,13	0,02201	0,0913	379
-«-	2006	4,22	0,02059	0,08696	334
-«-	2012	3,51	0,02798	0,09816	307
Скв. ВП1	2006	6,74	0,02544	0,1785	571
Скв. ВП8	2006	3,63	0,03198	0,1166	380
Скв. ВП15	2006	4,55	0,02327	0,1058	376
Скв. ВП9	2006	3,05	0,0307	0,0937	380
Скв. ВП17	2006	3,47	0,02579	0,0894	346
Скв. ВП19	2006	2,69	0,0565	0,1517	345
Скв. ВП21	2006	3,6	0,0252	0,0907	315
Скв. ВПС-4	2012	4,76	0,03350	0,15940	613
Скв. ВПС-6	2012	3,51	0,06431	0,22600	715
Скв. ВПС-10	2012	2,39	0,04821	0,11530	387
Скв. ВПС-21	2012	1,99	0,07811	0,15520	583
Скв. ВПС-22	2012	2,28	0,06115	0,13950	451
Скв. ВПС-26	2012	3,04	0,05980	0,18180	347
Скв. ВПС-28	2012	2,39	0,04821	0,11530	262
р. Золотица, 1 км выше карьера	2006	2,04	0,00449	0,00915	138
-«- 1 км ниже карьера	2006	3,33	0,01012	0,03366	210
-«- 5 км ниже карьера	2006	3,31	0,00757	0,02507	210
-«- 7 км ниже карьера	2006	2,45	0,00485	0,01192	219

Опробование поверхностных вод р. Золотицы показало, что сброс дренажных вод хорошо фиксируется по изотопам урана. Для выделения ореолов информативны как активности изотопов, так и их отношения, которые существенно повышены в подземных водах месторождения, по сравнению с поверхностными (рис. 4).

Сравнение результатов анализов подземных вод, извлекавшихся водопонизительными скважинами в 2006 и 2012 гг., позволил выявить некоторые закономерности изменений уран-изотопного состава подземных вод в условиях техногенного преобразования.

Как видно на рис. 5, в подземных водах, дренируемых водопонижительными системами карьера, за период 2006–2012 гг. произошло повышение общей минерализации (TDS) и активностей изотопов урана, при снижении значений отношений активностей изотопов.

Уран-изотопный состав воды отражает баланс между эффектами α -отдачи и скоростью растворения горных пород.

В работах (Малов, 2012; Malov, 2012a; 2012b) рассмотрена возможность оценки скоростей объемного растворения алюмосиликатов венда с использованием информации о распределении изотопов ^{234}U и ^{238}U в подземных водах и горных породах. Возможности таких оценок вытекают из свойств этой изотопной системы: два нуклида находятся в одной и той же цепочке радиоактивного распада. Поэтому их отношение обратно отношению постоянных распада в ненарушенной, закрытой системе, находящейся в радиоактивном равновесии:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1},$$

где N_1 и N_2 – количества атомов соответственно ^{238}U и ^{234}U , $\lambda_1 = 1.551 \cdot 10^{-10}$ лет $^{-1}$ и $\lambda_2 = 2.835 \cdot 10^{-6}$ лет $^{-1}$ – константы распада этих изотопов.

Горные породы и минералы сохраняют равновесное отношение активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (γ), равное единице: $\gamma = \frac{\lambda_2 \cdot N_2}{\lambda_1 \cdot N_1} = 1$, если они не были затронуты в последнее время физическими или химическими процессами, такими как измельчение или выщелачивание, то есть являются монолитными. Поэтому породы водоупоров во многих случаях практически однородны по этому показателю.

Отложения водоносных горизонтов частично теряют промежуточные продукты распада урана из-за эффекта альфа-отдачи, заключающегося в том, что при распаде атома ^{238}U происходит выброс альфа-частицы, а в противоположную сторону отбрасывается образующийся атом отдачи ^{234}Th . Если распад осуществляется вблизи границы раздела порода–жидкость, то этот атом переходит в воду и достаточно быстро преобразуется в ^{234}U . В результате в горной породе происходит снижение отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ по сравнению с равновесным значением, а в подземных водах появляется избыток ^{234}U (Чердынцев, 1955; Чалов, 1969); то есть наблюдается процесс фракционирования изотопов.

В твердой фазе этот эффект наиболее отчетливо проявляется на стадии осаждения осадка и диагенеза в слаболитифицированном состоянии, когда его пористость составляет порядка 0.7 (Maher, 2004; DePaolo, 2006) и он представляет идеальную пористую среду. Для зерен размерностью ила и глины (65–1 мкм) порядок потерь ^{234}U при фракционировании составляет от нескольких процентов до 50% (DePaolo, 2006). Однако для крупных зерен и их агрегатов относительная потеря ^{234}U мала; и равновесное отношение активностей, равное единице, практически сохраняется в осадке, а затем и в водовмещающей породе.

Возрастание отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в подземных водах, контактирующих не только с мелкозернистым, но и с любым материалом горных пород, намного заметнее ввиду того, что концентрации урана в воде обычно на 2–4 порядка ниже, чем в породе, и появление «дополнительного» атома ^{234}U вызывает в 100–10000 раз более заметный рост. Для водоносных горизонтов алюмосиликатных отложений характерны значения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, достигающие 10–20. Если твердая фаза одновременно растворяется, в процессе растворения в жидкость поставляется U с низким $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, обычно примерно равным 1, в результате чего отношение активностей снижается до 5–2 и ниже.

Таким образом, чем ниже значение отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, тем выше скорость химического растворения пород (рис. 6а) по сравнению со скоростью их радиационного разрушения (рис. 7а и б).

Рис. 6 и 7 демонстрируют тот очевидный факт, что при более высокой степени растворения пород в воду переходит большее количество урана и его активность и концентрация возрастают.

Вторым фактором, определяющим изменение отношения активностей изотопов урана, является продолжительность пребывания подземных вод в водоносном горизонте. В соответствии с законом радиоактивного распада происходит снижение отношения активностей изотопов одного семейства (см. рис. 6б, 7б).

Таким образом, наблюдаемые изменения уран-изотопного состава подземных вод можно связывать с подтягиванием к водопонижительным скважинам подземных вод с более высокой степенью неравновесности по отношению к водовмещающим породам. Последнее в первом приближении может иметь место при меньшей минерализации подземных вод, пониженных значениях их рН, повышенной активности водообмена.

Однако в нашем случае наблюдается повышение минерализации. Повышение минерализации подземных вод, откачиваемых водопонизительными скважинами, может быть связано с подтягиванием более минерализованных вод из залегающих ниже отложений мезенской свиты венда и со стороны расположенной западнее карьера палеодолины р. Золотицы (рис. 8), где ранее проводившимися работами установлено наличие минерализованных вод как в мезенской, так и в нижней части отложений падунской свиты венда (Малов, 2003).

Следовательно, наиболее вероятной причиной наблюдаемых изменений состава дренируемых водопонизительными скважинами подземных вод может являться повышение активности их водообмена.

Заключение

В результате длительного континентального перерыва в плиоцене – плейстоцене на восстановительных барьерах под переуглубленными палеодолинами, характерными для зоны сочленения Балтийского щита и Мезенской синеклизы, в осадочных отложениях венда происходило концентрирование урана, которое выражается значениями 15–20 мг/кг.

В голоцене, после отступления последнего ледника, произошло повышение темпов водообмена в водоносных горизонтах под палеодолинами, в результате чего сформировались окислительные для урана условия, и его активности в подземных водах существенно выросли. Максимальные значения характерны для фронта внедрения опресненных вод с возрастом 14 тысяч лет и менее в древние минерализованные воды.

Интенсивное дренирование водоносной толщи под палеодолинами техногенными водопонизительными системами ведет к еще большему повышению темпов водообмена, в результате чего концентрации урана возрастают еще интенсивнее, а отношения активностей его изотопов снижаются.

В исследованиях по данному разделу, проведенных под руководством А.И. Малова, принимали непосредственное участие Г.П. Киселев, С.В. Дружинин, С.Б. Зыков, А.В. Баженов, А.И. Поршневу, И.М. Киселева, Е.В. Зыкова (Институт экологических проблем Севера УрО РАН), М.В. Гонтарев (САФУ им. М.В. Ломоносова).

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН № 12-П-5-1009.

ЛИТЕРАТУРА

- Малов А.И.* Измерения *in situ* скоростей растворения алюмосиликатов венда // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы Всерос. конф. с участием иностранных ученых. Томск, 2012. С. 100–103.
- Методика выполнения измерений удельной активности изотопов урана (^{234}U , ^{238}U) в почвах, грунтах, горных породах и строительных материалах на их основе альфа-спектрометрическим методом с радиохимическим выделением. М.: ВИМС, 1999а. 17 с.
- Методика выполнения измерений объемной активности изотопов урана (^{234}U , ^{238}U) в пробах природных вод альфа-спектрометрическим методом с радиохимическим выделением. М.: ВИМС, 1999б. 17 с.
- Чалов П.И.* О механизме образования неравновесных соотношений между естественными радиоактивными изотопами в уран- и торийсодержащих природных соединениях // Атом. энергия. 1969. Т. 27, № 1. С. 26–32.
- Чердынцев В.В.* Об изотопном составе радиоэлементов в природных объектах в связи с вопросами геохронологии // Труды Третьей сессии Комиссии по определению абсолютного возраста геологических формаций. М., 1955. С. 175–233.
- Aries S., Valladon M., Polver M., Dupre B.* A routine method for oxide and hydroxide interference corrections in ICP-MS chemical analysis of environmental and geological samples // *Geostandard. Newslett.* 2000. Vol. 24, P. 19–31.
- DePaolo D.J., Maher K., Christensen J.N., McManus J.* Sediment transport time measured with U-series isotopes: Results from ODP North Atlantic drift site 984 // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2006. Vol. 248, № 1–2. P. 394–410.
- Maher K., DePaolo D.J., Lin J.C.F.* Rates of silicate dissolution in deep-sea sediment: *in situ* measurement using $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ of pore fluids // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2004. Vol. 68. P. 4629–4648.
- Malov A.I.* Uranium occurrence and behavior in groundwater (the example of North-West Russia) // *Uranium: characteristics, occurrence and human exposure* / Eds. A.Y. Vasiliev, M. Sidorov. N. Y.: Nova Science Publishers, 2012a. P. 155–183.
- Malov A.I.* Evaluations of ratios of various transition processes of uranium in groundwater from rocks by uranium isotopic data. 2012b. (Proceedings of the General Assembly of the

European Geological Union. Vienna, 2012) – Режим доступа:
http://presentations.copernicus.org/EGU2012-233_presentation.ppt.

Pokrovsky O., Viers J., Shirokova L. et al. Dissolved, suspended, and colloidal fluxes of organic carbon, major and trace elements in the Severnaya Dvina River and its tributary // *Chem. Geol.* 2010. Vol. 273. P. 136–149.

Vasyukova E., Pokrovsky O., Viers J. et al. Trace elements in organic- and iron-rich surficial fluids of the boreal zone: assessing colloidal forms via dialysis and ultrafiltration // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2010. Vol. 74. P. 449–468.

Yeghicheyan, D., Carignan J., Valladon M., Le Coz M.B., Aquilina L. A compilation of some trace elements measured in the natural river water standard SLRS-4 (NRCCNRS) // *Geostandard. Newslett.* 2001. Vol. 25. P. 468–474.

ПРИЛОЖЕНИЕ

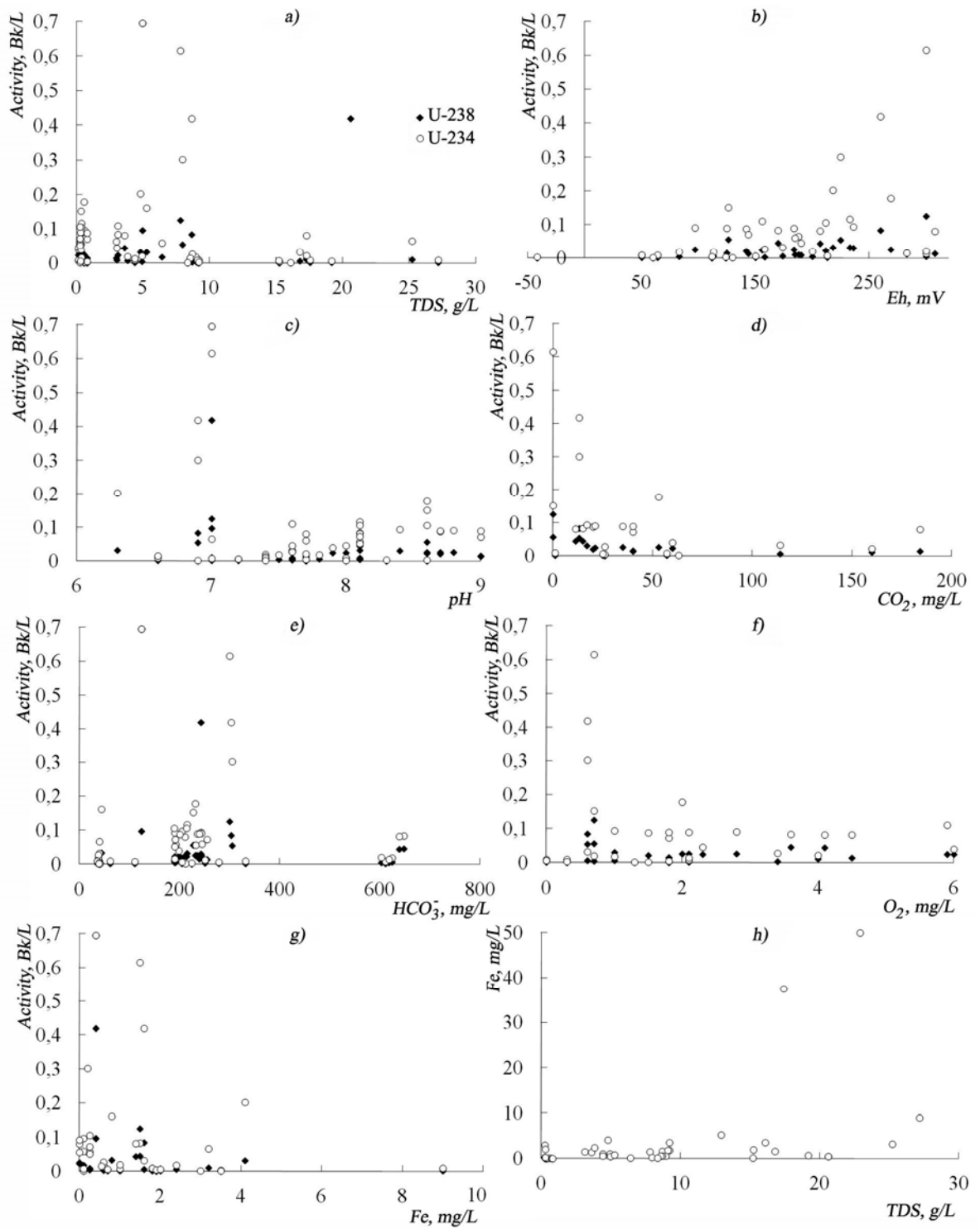


Рис. 1. Графические зависимости активности изотопов U (U-238, U-234) от показателей химического состава подземных вод: *a)* активность – минерализация (TDS), *b)* активность – Eh, *c)* активность – pH, *d)* активность – CO₂, *e)* активность – HCO₃⁻, *f)* активность – O₂, *g)* активность – Fe, *h)* Fe – минерализация (TDS)

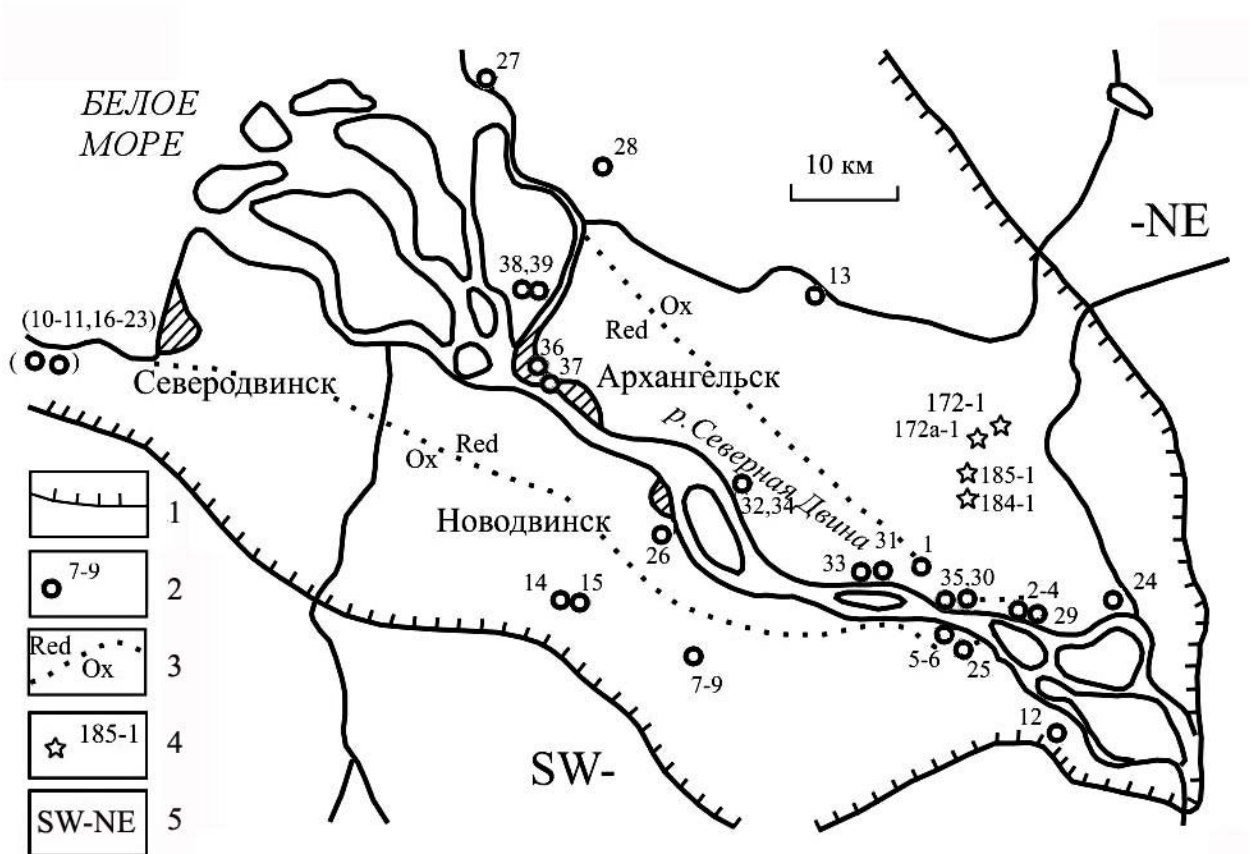


Рис. 2. Карта-схема условий формирования альфа-активных подземных вод
 1 – граница развития толщи микулинских глин Северо-Двинской впадины; 2 – водопункты, в которых производилось опробование подземных вод; 3 – контур области повышенных активностей U, приуроченный к фронту зоны пластового окисления, то есть к границе между областями с окислительными (Ox) и восстановительными (Red) для U^{6+} условиями; 4 – пункты опробования горных пород с нанесением номеров скважин; 5 – направление гидрогеологического разреза, показанного на рис. 3

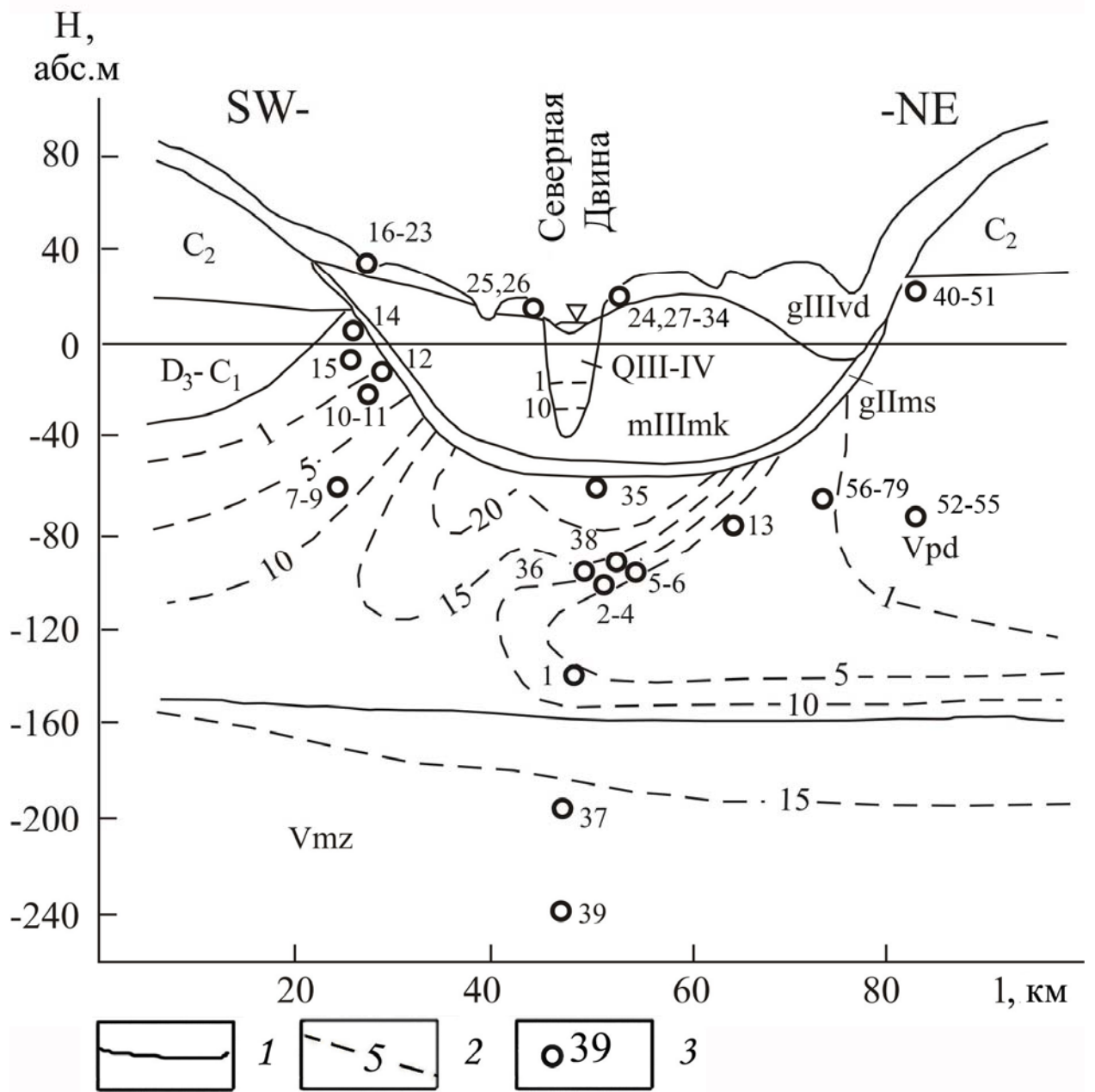


Рис. 3. Гидрогеологический разрез через Северо-Двинскую впадину
 1 – гидрогеологические границы; 2 – изолинии общей минерализации подземных вод в г/л; 3 – точки отбора проб подземных вод

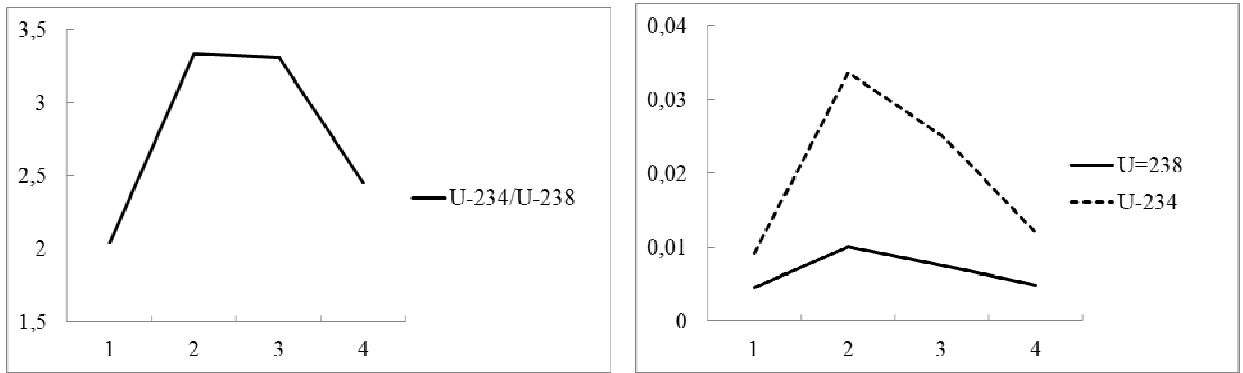


Рис. 4. Изменение активностей изотопов урана (U-238, U-234) и их соотношения (U234/U238) в р. Золотице в районе месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова в 2006 г.

1 – в 1 км выше по течению от карьера; 2 – в 1 км ниже; 3 – в 4 км ниже; 4 – в 6 км ниже

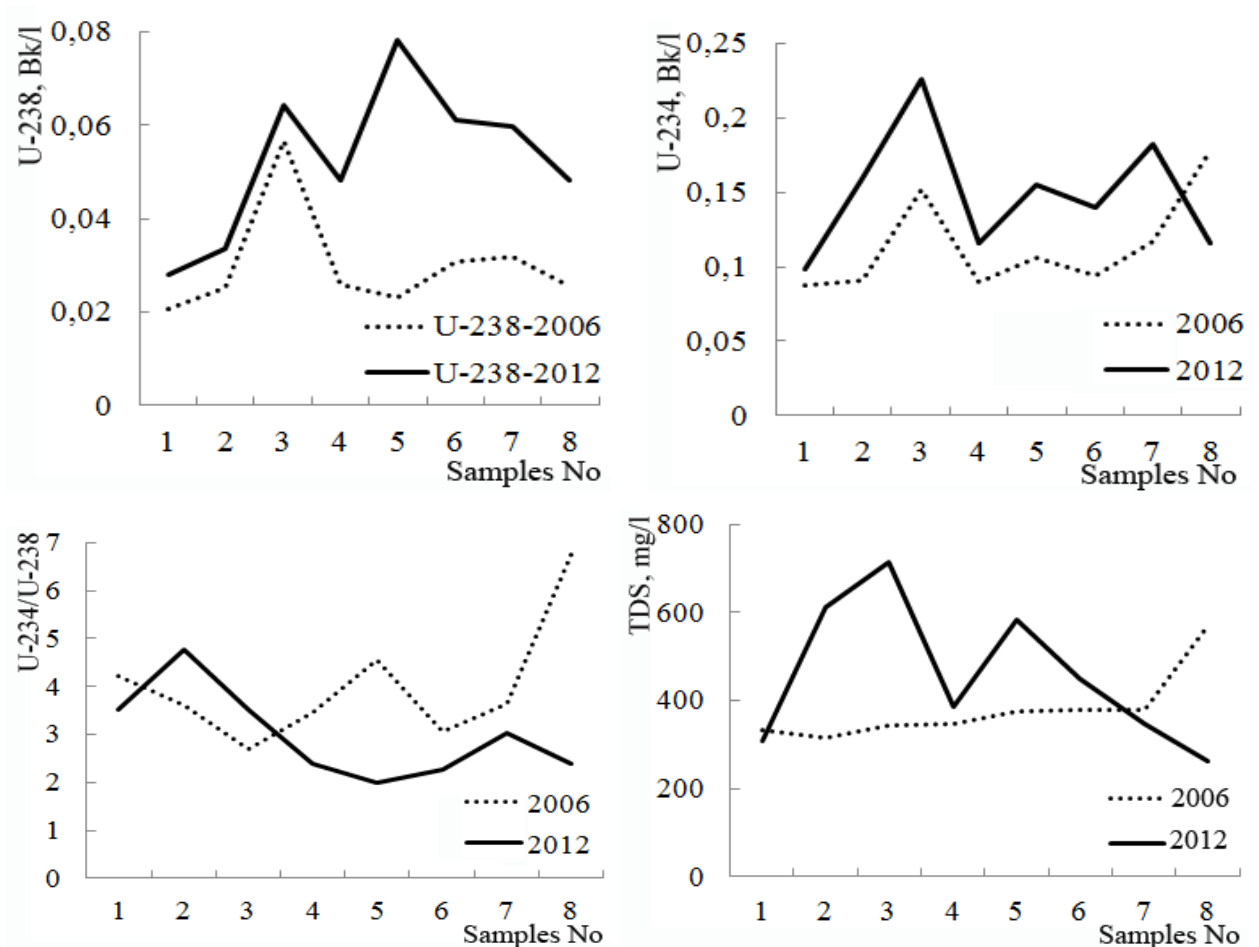


Рис. 5. Изменение активностей изотопов урана (U-238, U-234), их соотношения (U234/U238) и общей минерализации подземных вод (TDS), извлекаемых водопонижительными скважинами карьера на месторождении алмазов им. М.В. Ломоносова в 2006–2012 гг.

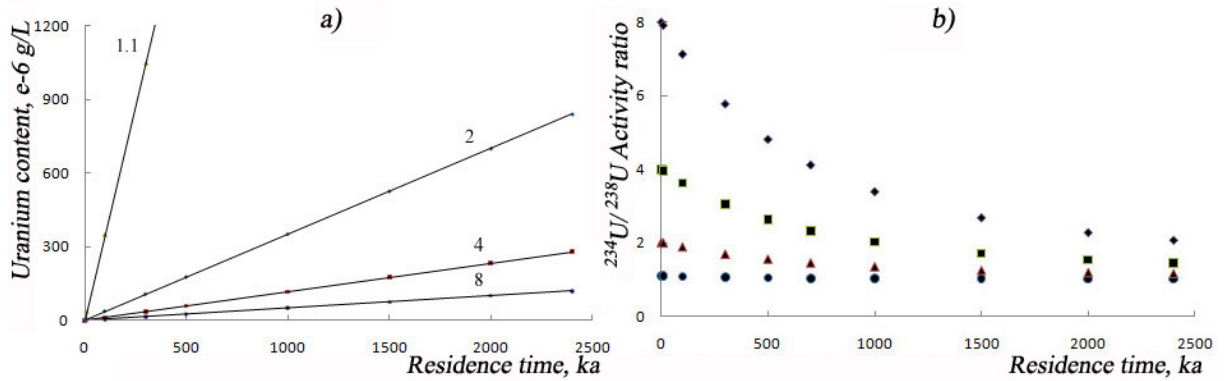


Рис. 6. Изменение концентрации ^{238}U в воде c_{1600} при различных исходных отношениях активностей изотопов $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, поступающих в воду и остающихся в ней на сегодняшний день (1.1, 2, 4 и 8) (a) и отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (b) в зависимости от времени пребывания воды в водоносном горизонте t (Malov, 2012a; 2012b)

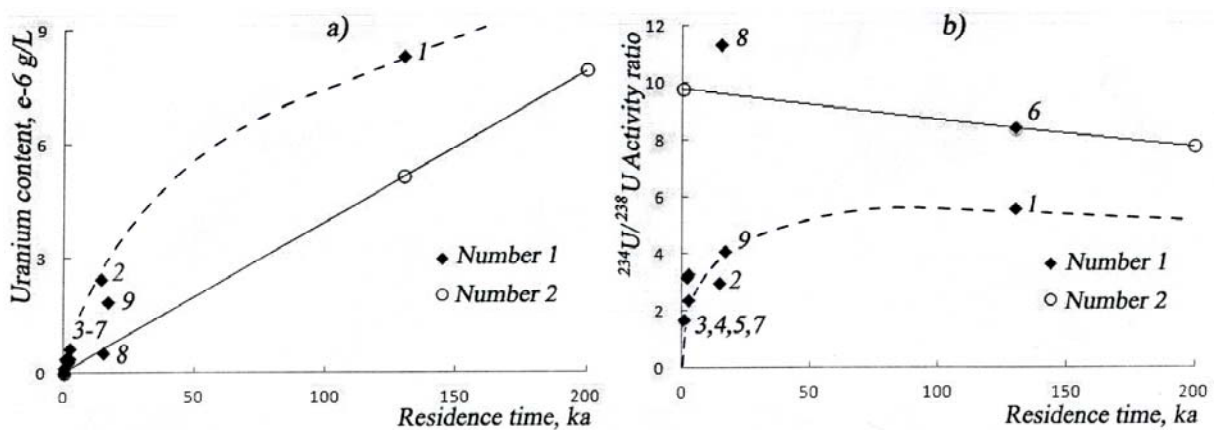


Рис. 7. Изменение концентрации ^{238}U в воде (a) и отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (b) в зависимости от времени пребывания воды в водоносных горизонтах Северо-Двинской впадины. Ряд *Number 1* – по фактическим данным; ряд *Number 2* – на основании расчетов изменения этих параметров только за счет радиационных процессов (Malov, 2012a; 2012b)

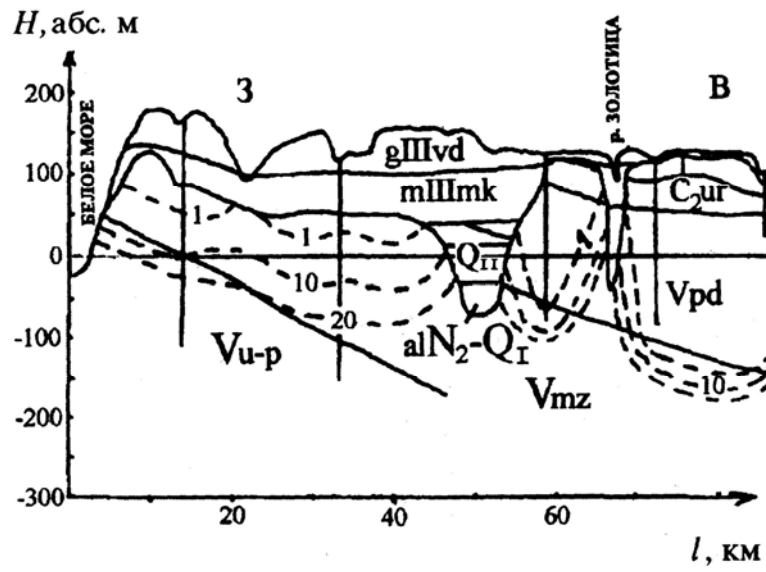


Рис. 8. Схематический гидрогеологический разрез через долину р. Золотицы. Пунктиром показаны изолинии общей минерализации подземных вод, г/л