

А. В. Мироненко, А. В. Миронова, В. Г. Румынин

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РОЛИ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СЕВЕРОДВИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЙОДНЫХ ВОД (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛ.)¹

Введение. Изучение Северодвинского месторождения йодных вод началось более 100 лет назад. Такой стабильно высокий интерес к месторождению обусловлен двумя факторами. Во-первых, это экономический аспект, поскольку по своим запасам оно до сих пор рассматривается как перспективное на добычу йода в промышленных концентрациях; во-вторых – чисто научный интерес. Дело в том, что данное месторождение является уникальным благодаря беспрецедентным условиям образования. В процессе формирования месторождения были задействованы механизмы, резко отличные от наиболее распространенных схем образования такого рода месторождений.

Как известно, в большинстве случаев появление высоких концентраций йода в подземных водах связано с термокаталитическим преобразованием рассеянного органического вещества [1]. В связи с этим типовые месторождения йодных вод приурочены к большим глубинам (порядка многих сотен и даже тысяч метров), на которых расположены продуктивные горизонты, прошедшие высокотемпературную стадию, а часто температура в них и теперь составляет 80–100 °С (йодные воды глубоких горизонтов Западной Сибири, Сахалина). Главным фактором перехода йода в жидкую фазу большинство авторов называют высокие температуры. Наиболее благоприятные палеотемпературы для выхода йода и протекания процессов высокотемпературного термолитиза наблюдаются в интервале 250–600 °С [2].

Между тем геологическая история формирования Северодвинского месторождения йодных вод свидетельствует о том, что этап термокаталитической деструкции рассеянного (захороненного) органического вещества не является обязательным для формирования йодных вод. Температура водоносных горизонтов, содержащих йодные воды, не превышала 10 °С. Глубина подошвы самой нижней йодсодержащей толщи была не более 150 м. Тем не менее образовалось месторождение с концентрациями йода до 35–40 мг/л. Данные исследований уникального Северодвинского месторождения йодных вод говорят о том, что возможно формирование месторождений йодных вод, в которых может быть пропущен высокотемпературный этап, рассматриваемый большинством исследователей как необходимый для появления повышенных концентраций йода в подземных водах.

Таким образом, Северодвинское месторождение уникально, по крайней мере, по двум параметрам: как самое «молодое» и как не прошедшее стадию термокаталитической деструкции погребенного органического вещества (самое «холодное»).

В настоящее время рассматриваемое месторождение йодных вод находится в стадии разрушения. Несомненный интерес представляют протекание во времени собственно процесса формирования и разрушения месторождения, выявление механизмов, обеспечивающих возможную регенерацию месторождения.

За более чем 100-летний период изучения месторождения накопилось огромное количество фактического материала, разными авторами было выдвинуто несколько гипотез об

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-05-64231-а), Федерального агентства по науке и инновациям (Гос. контракт № 02.435.11.4001 по теме РП-13.2/001) и МНТЦ (проект № 3193).

условиях его формирования [3, 4]. Однако большинство из этих построений представляет собой прикидочные расчеты или предположения. Между тем полученный в последние годы объем данных, главным образом по Бобровскому участку, позволяет дать достаточно корректное количественное описание процесса образования и деградации месторождения. Это приводит к оценке значимости отдельных процессов, ответственных за формирование месторождения. Авторами статьи было проведено комплексное исследование, состоящее из двух независимых методов оценки интенсивности протекания молекулярно-диффузионных процессов во вмещающих породах, дающих возможность на количественном уровне охарактеризовать условия формирования и разрушения месторождения йодных вод.

1. Особенности геолого-гидрогеологических условий месторождения. В геологоструктурном отношении месторождение приурочено к Северодвинской впадине (рис. 1, 2), а вернее, к той ее части, где наблюдаются повышенные мощности отложений микулинских глин (mQIII_{mk}) – от 30 до 100 м, содержащих в больших объемах органическое вещество. Собственно, именно оно и является основным источником поступления йода в поровый раствор глин, а также в нижележащий падунский водоносный горизонт (V_{pd}), залегающий на глубинах от 50 до 100 м от поверхности земли, мощность которого достигает 100–120 м. Падуnsкие породы представлены переслаивающимися отложениями песчаников (60–80%) и алевролитов (20–30%) с подчиненными прослоями аргиллитов. Тип проницаемости – трещинно-поровый. Движение подземных вод в падуnском горизонте осуществляется по проницаемым песчаникам или трещинам, разбивающим среду на блоки, в которых содержится поровый раствор.

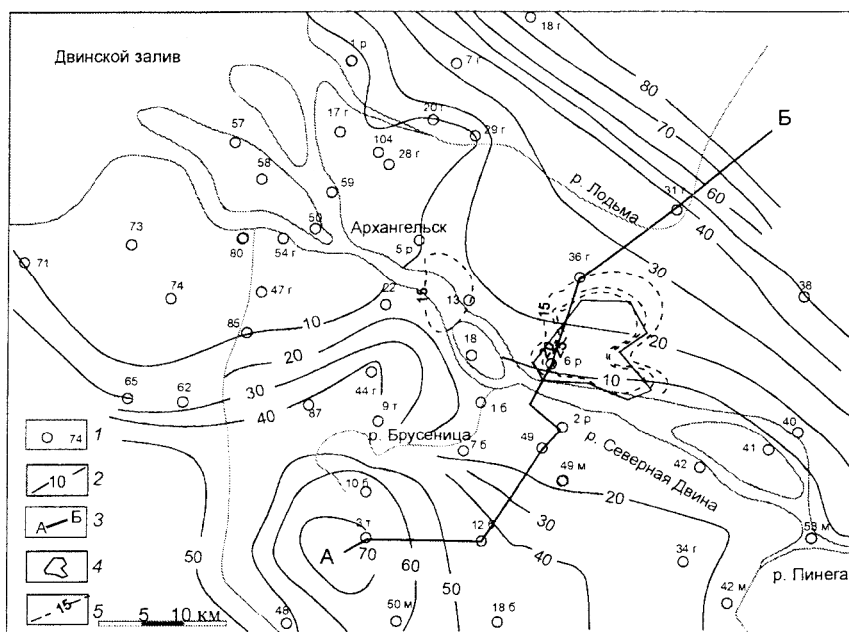


Рис. 1. Гидрогеологическая схема Северодвинской впадины ([4] с дополнениями). 1 – номер гидрогеологической скважины; 2 – пьезоизогипсы (м); 3 – линия разреза (см. рис. 2); 4 – Бобровский участок месторождения йодных вод; 5 – изолинии содержания йода в пределах месторождения (мг/л).

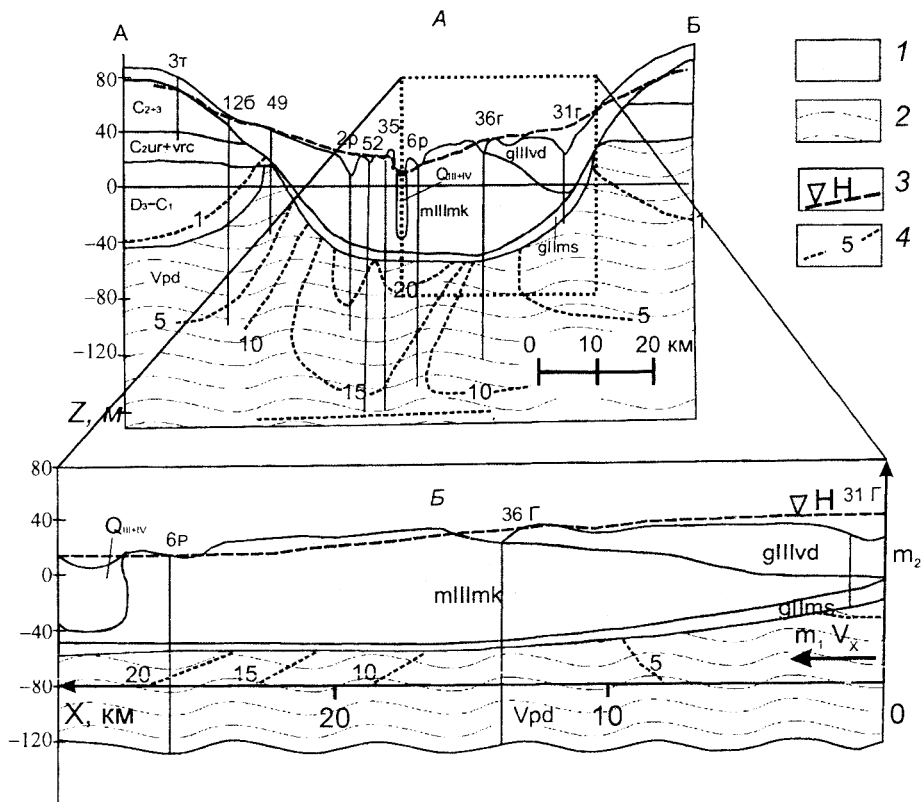


Рис. 2. Региональный гидрогеологический разрез по линии А–Б на рис. 1 [6] (А) и локальная врезка – модельная (расчетная) область (Б).

1 – микулинские глины и терригенно-карбонатные породы, перекрывающие падунские отложения; 2 – падунские отложения; 3 – уровень подземных вод; 4 – изолинии минерализации (г/л).

Раствор с высокими концентрациями йода приурочен к линзам песков мощностью до 10 м, залегающих в толще микулинских глин, а также к верхней части падунского горизонта (первые 40 м). Содержание йода примерно пропорционально минерализации (10–27 г/л) и колеблется в пределах от 10 до 30 мг/л (по отдельным пробам до 40 мг/л). Промышленные запасы йода были разведаны в 1998–2004 гг. на одном из участков месторождения – Бобровском (см. рис. 1).

Основное питание горизонт получает из перекрывающих его карбонатных отложений нижнего и среднего карбона (C_{2+3}), распространяющихся на северо-востоке и юго-западе изучаемого участка, но выклинивающихся в районе Северодвинской впадины. Согласно разрезу на рис. 2, толща микулинских глин в центральной части впадины прорезана Северной Двиной. В нее происходит разгрузка подземного потока падунского водоносного комплекса с северо-востока и юго-запада (см. рис. 1, 2). Его средние гидравлические градиенты (J) составляют $(1,2 \div 1,8) \cdot 10^{-3}$. Наблюдается перепад напоров (3–5 м) между падунским водоносным горизонтом и горизонтом четвертичных отложений, что определяет потенциальную возможность восходящего движения (перетекания) воды в микулинских глинах.

Опытно-фильтрационные работы (ОФР), проведенные при разведке Бобровского участка Северодвинского месторождения йодных вод в 2003–2004 гг., показали, что рассеянию

йодсодержащих вод по всей мощности падунских отложений препятствует регионально выдержанный слой слабопроницаемых аргиллитов, отделяющий верхнюю (примерно 30–40 м) часть относительно хорошо проницаемых отложений от нижних зон разреза того же комплекса пород.

Средний коэффициент фильтрации отложений падунской свиты венда на рассматриваемом объекте варьируется в пределах от 0,35 до 0,75 м/сут. (данные получены на основе интерпретации ОФР и результатов численного моделирования). Средняя пористость – около 25%.

Подземные воды песчаных прослоев в толще микулинских глин соленые, их минерализация составляет 10–15 г/л. Состав хлоридно-натриевый, близкий к составу морской воды, в которой восстановлен сульфат-ион.

Содержание йода в глинах достигает 30–40 мг/л. Отмечается тенденция уменьшения минерализации поровых вод сверху вниз по разрезу падунского комплекса [4].

2. Геологические условия формирования месторождения. На основе большого количества накопленного фактического материала различными авторами обсуждались гипотезы формирования месторождения. Принципиального расхождения между ними нет, так как авторы являются сторонниками «поверхностной» гипотезы образования месторождения. Расхождения начинаются при попытках количественной оценки процесса формирования и разрушения месторождения (как с точки зрения механизмов, ответственных за процесс, так и временных интервалов).

Схематическое представление условий образования и разрушения месторождения выглядит следующим образом.

1. Образование толщи микулинских глин с прослоями песчаников ($mQ_{III}mk$) большинством исследователей принимается в интервале 70–50 тыс. лет назад в период трансгрессии бореального моря микулинского межледниковья в пределах побережья Белого моря. Первоначально это были илы с пористостью порядка 60–80% и с большим содержанием органических остатков йодсодержащих водорослей и планктона, которые и послужили источником поступления йода в поровый раствор глин. В настоящее время их пористость оценивается значением около 40%, плотность – 2,04 г/см³. Уплотнение глин и, как следствие, отжатие из них йодсодержащих растворов в подстилающие отложения падунской свиты венда происходили под влиянием собственного веса глин, а также веса валдайского ледника ($gQ_{III}vd$), перекрывающего их в период времени от 70 до 10 тыс. лет назад.

2. Йод в составе вод морского генезиса накапливался преимущественно в верхней части падунского горизонта. Засолению нижних зон разреза, где в настоящее время минерализация воды не превышает 10–12 г/л (концентрация йода – не более 5 мг/л), препятствовала естественная фильтрационная стратификация разреза (наличие слабопроницаемых аргиллитовых прослоев).

3. После отступления валдайского ледника, сыгравшего важную роль в формировании изучаемого месторождения йода, около 10 тыс. лет тому назад начался период его разрушения. Этот процесс связан с движением пресных инфильтрационных вод, формирующихся на лево- и правобережье Северной Двины за контуром распространения микулинских глин, через засоленные падунские породы к области их естественного дренирования. Под влиянием данного процесса происходит постепенное вытеснение йодных вод, результатом которого стало опреснение пластовых вод в зонах, примыкающих к областям питания водоносного горизонта отложений падунской свиты венда. Скопления йода наблюдаются на площадях, тяготеющих к центральной части Северодвинской впадины. При этом отмечается тенденция сохранения повышенных концентраций йода в менее проницаемых породных блоках, что подтверждает гипотезу об активном протекании процессов природного разрушения месторождения.

Определенный интерес представляют оценки механизмов, сдерживающих процесс разрушения. Одним из них, по нашему предположению, является молекулярная диффузия, обеспечивающая восполнение запасов йода в падуновском водоносном горизонте на современном этапе.

3. Основные результаты. Представим результаты двух типов исследований по количественной оценке диффузионных свойств как микулинских глин, так и аргиллитов падуновского горизонта. Первое исследование базировалось исключительно на аналитических расчетах, описывающих процесс формирования и разрушения месторождения. Была сделана попытка оценить соотношения конвективного и диффузионного потоков в толще микулинских глин. Второй комплекс исследований представлен набором лабораторных экспериментов с керновым материалом, отобранным на участке месторождения с целью определения его диффузионных свойств.

3.1. Модельные исследования процесса разрушения месторождения. Основные элементы схематизации процесса представлены на рис. 2, где приведен осредненный разрез, который совпадает с линией тока, направленной от области питания к области разгрузки подземных вод в речную долину. Данный разрез заимствован из работы [4]; на нем показаны изолинии минерализации C . Соответствующие значения $C = f(x)$ (рис. 2) использовались для калибровки модели двухслойной толщи: нижний слой – хорошо проницаемые падуновские породы, где преобладает горизонтальная конвекция, верхний – микулинские глины, здесь доминирует молекулярная диффузия, на которую накладывается восходящий конвективный поток.

Средняя скорость фильтрации подземных вод по напластованию $v_{cp} = kJ = (1,2 \div 1,8) \times 10^{-3} \text{ м/м} \times 1 \text{ м/сут.} = (1,2 \div 1,8) \cdot 10^{-3} \text{ м/сут.} = 0,44 \div 0,66 \text{ м/год.}$ В граничном ($x = 0$) сечении, с учетом возможности потери расхода регионального потока воды за счет перетекания ее через микулинские отложения, примем $v_0 = 0,9 \text{ м/год.}$ Мощность пласта (верхняя зона разреза, где концентрируется йод) $m_1 = 40 \text{ м.}$ Значения пористости вендских и четвертичных отложений – $n_1 = 0,25$ и $n_2 = 0,4$ соответственно. Исходная концентрация (минерализация) воды $C_0 = 35 \text{ г/л}$ (морские воды, отжатые из микулинских глин). Поток пресных подземных вод от границы $x = 0$ характеризуется значением $C^0 = 1 \text{ г/л.}$ Расчетное время $t = 10\,000 \text{ лет}$ (считается, что процесс опреснения падуновской толщи начался в момент завершения валдайского оледенения). По данным исследований фактического материала на Бобровском участке месторождения йодных вод была выведена корреляционная зависимость между концентрацией йода и минерализацией подземных вод в верхней части падуновского водоносного комплекса.

Описанный процесс переноса вещества с учетом вертикальной конвекции математически может быть представлен следующей системой уравнений:

$$n_1 \frac{\partial C_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (v_{x1} C_1) + W_s = 0, \quad (1)$$

$$n_2 \frac{\partial C_2}{\partial t} \pm v_{z2} \frac{\partial C_2}{\partial z} - D_M \frac{\partial^2 C_2}{\partial z^2} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_{x1}}{\partial x} \pm \frac{v_{z2}}{m_1} = 0, \quad (3)$$

где индексы 1 и 2 относятся к водоносному и разделяющему слоям; W_s – удельная интенсивность межслоевого обмена, определяемая соотношением

$$W_s = - \frac{D_M}{m_1} \frac{\partial C_2}{\partial z} \Big|_{z=0} \pm \frac{v_{z2}}{m_1} C_2 \Big|_{z=0}. \quad (4)$$

Уравнения (1) и (4) отвечают балансу вещества и жидкости в водоносном слое, а (2) – молекулярной диффузии, осложненной вертикальной конвекцией (со скоростью v_{x2}) в разделяющем слое; знак «+» соответствует случаю, когда направления диффузионного и конвективного потоков совпадают. В рассматриваемом случае был использован отрицательный знак.

Решение системы уравнений (1)–(4) при однородных начальных и граничных условиях получено в форме [5, 6]

$$\bar{C}_1^- = \frac{1}{2} \left[e^{-P} \operatorname{erfc} \left(\frac{1-T}{2\sqrt{T/P}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{1+T}{2\sqrt{T/P}} \right) \right], \quad (5)$$

где $T = \frac{v_{z2} m_1 n_1}{D_M n_2} \left(\frac{t-t_0}{t_0} \right)$; $P = \frac{v_{z2} t_0}{m_1 n_1}$; $t_0 = \pm \frac{n_1}{b} \ln \left(\frac{a \pm bx}{a} \right)$. Здесь $a = v_{x1}^0$ – скорость фильтрации во входном сечении пласта, $b = -v_{z2} / m_1$.

Формула (5) описывает опреснение падунского водоносного горизонта за счет вытеснения йодсодержащих минерализованных вод региональным потоком инфильтрационных вод. В данной модели учтена диффузия соли (и соответственно растворенного йода) из перекрывающих микулинских глин, препятствующая процессу вытеснения. Восходящий поток воды в глинах (как следствие перепада напоров между нижним и верхним горизонтами), включенный в эту модель, является фактором, замедляющим скорость массопереноса на фронте контакта растворов, а также ослабляющим интенсивность межслоевого массообмена.

Расчеты по формуле (5) позволили подобрать параметры v_{z2} ($= 2,5 \cdot 10^{-4}$ м/год $= 6,85 \times 10^{-7}$ м/сут.) и D_M ($= 8 \cdot 10^{-4}$ м²/год $= 2,19 \cdot 10^{-6}$ м²/сут.), наилучшим образом описывающие наблюдаемые распределения минерализации $C(x)$ (рис. 3) в пределах рассматриваемого профиля (см. рис. 2). Как видно, величина $C(x)$ довольно чувствительна к колебаниям характеристик v_{z2} и D_M , что, в частности, свидетельствует о значимости соответствующих процессов в формировании наблюдаемой гидрогеохимической зональности воды в падунских отложениях. Нетрудно заметить, что за 10 000 лет при существующих действительных скоростях миграции $u = v_{x1}/n_1 = 2,5-3,5$ м/год вся толща оказалась бы заполненной пресной инфильтрационной водой. Следовательно, сохранность месторождения йода во многом обеспечивается диффузионным обменом между падунским горизонтом и перекрывающей его толщей йодсодержащих микулинских глин.

3.2. Лабораторные исследования.

3.2.1. Методика. Образцы исследуемого нами в лабораторных условиях керна отобраны на Бобровском участке Северодвинского месторождения йодных вод. Сами образцы изначально представляли собой запарафинированные цилиндры диаметром до 5 см и высотой до 25 см. Отбор происходил в скважине 6н/3 (разрез представлен на рис. 4). Исследуемые породы приурочены к кровле падунского горизонта (аргиллиты) (Vpd) и подошве толщи микулинских глин (mQIIImk). Таким образом, по результатам лабораторных экспериментов мы имеем возможность получить представление о диффузионных свойствах пород продуктивного горизонта и перекрывающего их водоупора.

Все отобранные породы были с измененной естественной влажностью. Микулинские глины представлены образцами керна серого цвета с визуально заметными включениями органического вещества. Часть органики (водоросли, содержащие йод) разложилась и провзаимодействовала с глинистыми минералами, образовав на их поверхности органоминеральные комплексы. По минералогическому составу микулинские глины можно отнести к минералам группы смектитов – монтмориллониту ($\text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Однако вследствие замещений Al в октаэдрическом слое на Fe, Mg, Zn, Li [7] состав глин более разнообразный.

Керн из падунского водоносного комплекса представляет собой плотную породу красно-коричневого цвета, состоящую из последовательно чередующихся слоев красно-коричневых аргиллитов и осветленных алевроитов мощностью от 2 до 5 см. Отсутствие цвета последних объясняется нами тем, что, вероятно, они были промыты

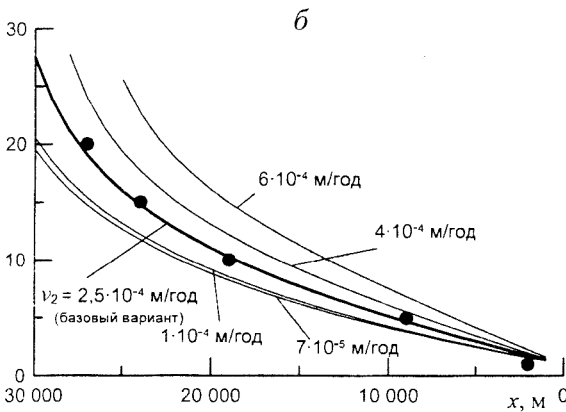
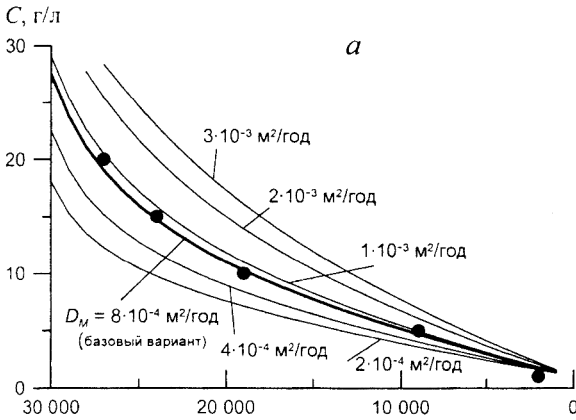


Рис. 3. Наблюдаемые (точки) и расчетные (линии) изменения минерализации подземных вод вдоль линии тока. Жирная линия – результаты расчетов при базовых параметрах $v_{22} = 2,5 \cdot 10^{-4}$ м/год и $D_M = 8 \cdot 10^{-4}$ м²/год (значения остальных характеристик даны в тексте); тонкие – при отклонении значений D_M (а) и v_{22} (б) от базовых величин.

потоком подземных вод падунского водоносного горизонта. Тогда возникает предположение о наличии в исследуемых толщах среды с тройной пористостью [9]. Роль блоков играют аргиллиты, а помимо трещин, по которым идет вода, – проводящие слои алевритов.

Основная задача лабораторных экспериментов сводилась к определению коэффициента молекулярной диффузии для конкретных образцов глин и аргиллитов Северодвинского месторождения йодных вод.

В процессе лабораторных исследований проводились диффузионные эксперименты на 15 образцах. Каждый индивидуальный эксперимент характеризуется конкретным набором параметров – концентрациями растворов, размерами образцов (табл. 1).

Таблица 1. Исходные параметры образцов

Вид эксперимента	№ образца	Тип породы	$V_{обр}$, см ³	V_k , мл	C^0 , мг/л	C_k^0 , мг/л	h_k , см
1	1	Аргиллит	84,8	90	0	100	3,2
	2		27	100			11,1
	3		19,7	75	50	10,3	
	4		84,9	100	100	2,8	
3	5, 6, 7	Аргиллит	47–93	400	0	50–150	–

Примечание. V_k – объем камеры; $V_{обр}$ – объем образца; C^0 – исходная концентрация КИ в образце; C_k^0 – исходная концентрация КИ в камере; h_k – высота камеры с раствором, находящимся в контакте с породой.

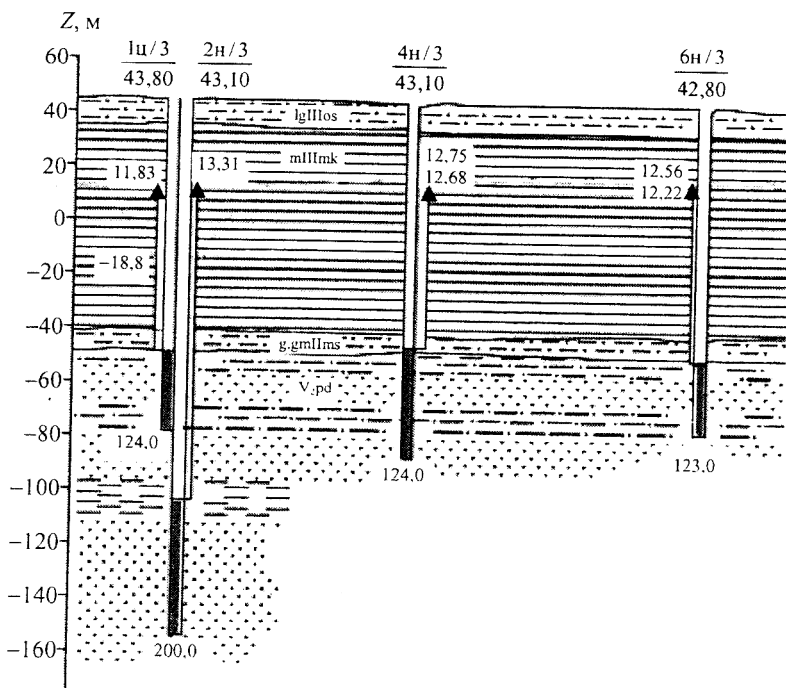


Рис. 4. Схема куста скважин, в которых был отобран керн.

В табл. 1 включено описание только тех лабораторных экспериментов, которые представляются авторам наиболее надежными.

Все замеры концентраций йода в растворах производились с помощью иономера, к которому подключались йодселективный электрод и электрод сравнения. Калибровка осуществлялась по заранее приготовленным стандартным растворам KI. Концентрации этих растворов варьировали от 10^{-7} моль/л (0,0167 мг/л) до 10^{-3} моль/л (167 мг/л). Соответственно все диффузионные эксперименты проводились при низких концентрациях йода (в рабочих растворах) – в соответствии с его реальной концентрацией в микулинских глинах и верхней части падунского водоносного комплекса.

Перед началом диффузионных экспериментов керн подготавливался к работе, а именно: вырезался образец породы правильной формы (куба или цилиндра), взвешивался, помещался в сушильный шкаф при температуре 120°C . Затем он насыщался под вакуумным водоструйным насосом, позволяющим создать давление в 70 мм рт. ст., раствором с определенной концентрацией C^0 (табл. 1). Далее образец использовался в зависимости от вида эксперимента.

В качестве базовых были применены три экспериментальные схемы (размеры образцов приведены в табл. 1).

Первая: диффузия из раствора KI в образец, насыщенный дистиллятом. Насыщенный дистиллятом образец породы погружается в раствор KI. Затем происходит фиксация ухода йодид-иона из свободного раствора в образец (рис. 5, а).

Вторая: диффузия из образца породы в раствор. Эксперимент сводится к тому, что образец породы насыщается под вакуумным насосом раствором KI определенной концентрации C^0 (табл. 1), а затем помещается в дистиллят или заранее приготовленный модельный раствор (раствор, по составу максимально приближенный к минерализации реального порового раствора породы) (рис. 5, б).

Третья: диффузия через образец между двумя камерами (инъекционной и регистрационной). Образец цилиндрической формы помещается в кассету между двумя ячейками. В одну ячейку заливается раствор KI, а в другую – дистиллят или модельный раствор. По ходу эксперимента в одной ячейке фиксируется уход йодид-иона а в другой – его появление. Замеры концентраций происходят одновременно в обеих камерах (рис. 5, в).

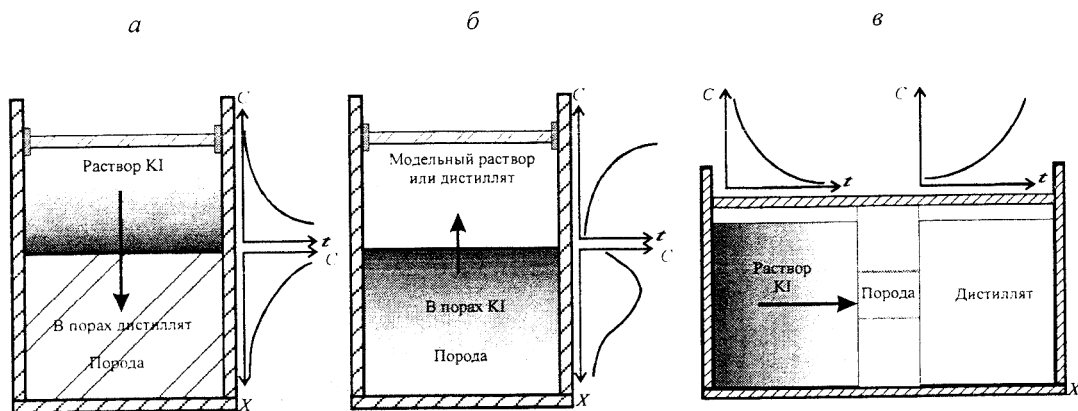


Рис. 5. Концептуальные схемы лабораторных опытов.

а, б и в соответствуют первой, второй и третьей экспериментальным схемам (см. текст); t – время проведения эксперимента; C – концентрация йода; X и t – линейные пространственная и временная координаты.

3.2.2. Аналитические решения для базовых экспериментальных схем. Исходное дифференциальное уравнение, описывающее диффузионные процессы без конвективного переноса, можно представить в виде

$$n \frac{\partial C}{\partial t} - D_M \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 0, \quad (6)$$

где C – текущая концентрация в образце; x – линейная координата; n – пористость; D_M – коэффициент молекулярной диффузии; t – время.

Для интерпретации первого вида экспериментов использовалось решение уравнения, полученное при условии неограниченного в объеме образца: $C(x, t = 0) = 0$, $C_k(t = 0) = 0$,

$h_k \frac{\partial C_k}{\partial t} = -D_M \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0}$, $C_k = C(x = 0, t)$, $\frac{\partial C}{\partial x}(x \rightarrow \infty, t) = 0$. В таком случае решение уравнения (6) можно представить следующим образом:

$$\bar{C}_k = e^{\alpha^2 t} \operatorname{erfc}(\alpha \sqrt{t}). \quad (7)$$

Здесь $\alpha = \sqrt{\frac{D_M n}{h_k}}$, $\bar{C}_k = C_k / C_0$, \bar{C}_k – относительная концентрация, C_k – текущая концентрация в камере (растворе) (мг/л).

При проведении второй серии экспериментов (см. п. 3.2.1) образец породы был относительно небольшого размера (см. табл. 1). Поэтому обработка опытных результатов на основе решения (7), полученного для неограниченного в объеме образца, представляется некорректной. В этом случае должно использоваться более полное решение задачи, полученное при граничном условии: $\frac{\partial C}{\partial x}(x = L) = 0$ [8]. В результате была получена формула, удовлетворяющая условиям второго вида экспериментов:

$$\bar{C}_k = \frac{1}{1 + \bar{L}} + \sum_{N=1}^{\infty} \frac{2 \bar{L} e^{(-\tau \beta_N'^2 / \bar{L}^2)}}{\beta_N'^2 + \bar{L}^2 + \bar{L}}, \quad (8)$$

в которой $\bar{L} = \frac{nL}{h_k}$, $\tau = \alpha^2 t$, $\beta'_N = \beta_N L$, где L – длина образца; β_N – корень уравнения $\beta_N \operatorname{ctg} \beta_N = \bar{L}$.

На рис. 6 представлены распределения относительных концентраций в растворе $\bar{C}_k(\tau)$, полученные по формуле (8) при различных \bar{L} . Видно, что при малых размерах образца выравнивание концентраций в камере и породе происходит достаточно быстро, а при увеличении размера образца оно достигается за больший период времени. Асимптотические значения концентрации (при $t \rightarrow \infty$) $\bar{C}_\infty = \frac{1}{1+\bar{L}}$. Для неограниченного размера образца, т. е. когда $\bar{L} \rightarrow \infty$, $\bar{C}_k \rightarrow 0$.

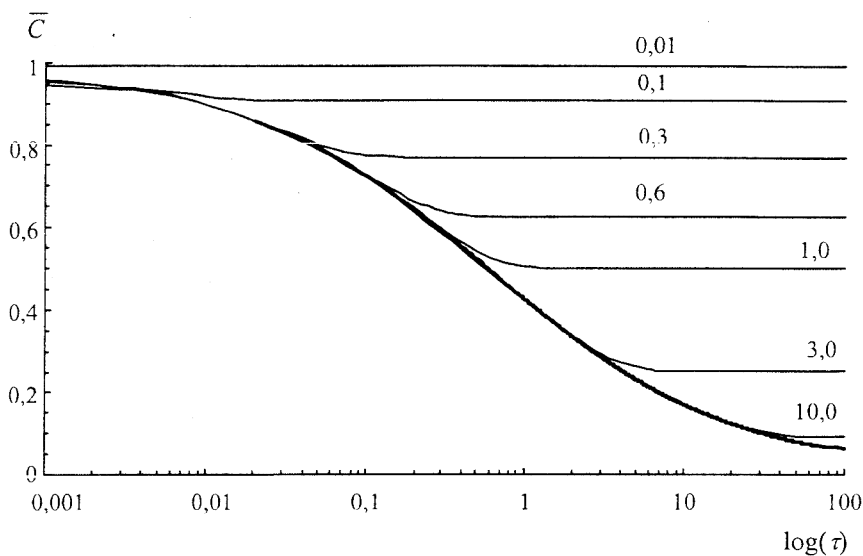


Рис. 6. Графики функции $\bar{C}_k = \bar{C}_k(\tau, \bar{L})$.
Цифры у кривых – значения параметра \bar{L} .

3.2.3. Интерпретация лабораторных экспериментов. Непосредственным результатом экспериментов является оценка коэффициента молекулярной диффузии (D_M) посредством интерпретации зависимости $\bar{C}(t)$, которая характеризует динамику движения йода за счет градиентов концентраций. Параметр D_M рассчитывается путем совмещения графиков – экспериментальных и полученных при аналитическом решении соответствующих миграционных задач.

Расчет активной пористости (n) образцов основывался на уравнениях баланса вещества для двух расчетных схем (диффузия в образец (первая схема) и из образца (вторая схема)).

Уравнение баланса вещества для первой схемы можно представить в виде

$$nV_{\text{обp}} C^\infty + C^\infty V_k = C_k^0 V_k,$$

$$n = \frac{V_k}{V_{\text{обp}}} \left(\frac{C_k^0}{C_x} - 1 \right), \quad (9)$$

а для второй,

$$nV_{\text{обр}}C^x + C^xV_k = C^0V_{\text{обр}}n,$$

$$n = \frac{V_k}{V_{\text{обр}}} \left(\frac{C^\infty}{C^0 - C^\infty} \right), \quad (10)$$

где C^∞ – максимально возможная концентрация при выходе КИ из образца (вторая схема) и при уходе КИ из камеры (первая схема); V_k – объем камеры; $V_{\text{обр}}$ – объем образца; C^0 – исходная концентрация КИ в образце (вторая схема); C_k^0 – исходная концентрация КИ в камере (первая схема).

Для опытов с ограниченным размером образца (первая и вторая схемы) максимально возможной концентрацией (C^x) считалась измеряемая концентрация на конечный момент эксперимента, а именно во время выхода кривых $\bar{C}_k(t)$ на квазистационарный режим.

Исходные данные для расчетов брались из табл. 1, а полученные параметры внесены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты лабораторных экспериментов

Вид эксперимента	№ образца	График	Порода	Расчет по формуле	C^x , мг/л	n	$D_M \cdot 10^{-5}$, м ² /сут.
1	1	Рис. 7	Аргиллит	(8)	65,5	0,56	5,87
2	2	Рис. 8, кривая 1	Глина		6,9	0,6	5,14
	3	Рис. 8, кривая 2			6,4	0,56	6,80
	4	Рис. 8, кривая 3			22,9	0,35	9,16
3	7	Рис. 9, кривая 3	Аргиллит	(7)	–	0,64	8,5

Анализ наиболее представительных экспериментов (рис. 7–9, табл. 2) позволяет сделать следующие выводы. Полученные значения D_M при использовании первой экспериментальной схемы близки к параметру D_M из второй серии опытов (табл. 2), т. е. диффузионные свойства микулинских глин и аргиллитов падунского водоносного горизонта близки друг к другу. Величины D_M в образцах № 1–3 колеблются в пределах от $5,04 \cdot 10^{-5}$ до $6,80 \cdot 10^{-5}$ м²/сут. При испытании образца № 4 (вторая экспериментальная схема) был выбран модельный раствор, примерно отвечающий составу пластовой воды. В этом случае был получен заметно более низкий коэффициент D_M ($9,16 \cdot 10^{-6}$ м²/сут). Это значение нам представляется наиболее реальным для данного типа отложений.

Определенные экспериментальные значения пористости достаточно высоки, по сравнению с данными изучения с использованием других методов (по которым $n = 0,39$). Это можно объяснить тем, что процесс выхода КИ из образцов в дистиллированный раствор привел к электрокинетическому дисбалансу в породе и увеличению порового пространства. Подтверждение тому – опыт с реальным раствором (образец № 4), давший $n = 0,35$.

При обработке результатов опытов по третьей экспериментальной схеме интерпретация распределения йода во времени для всех образцов оказалась затруднительной, поэтому был

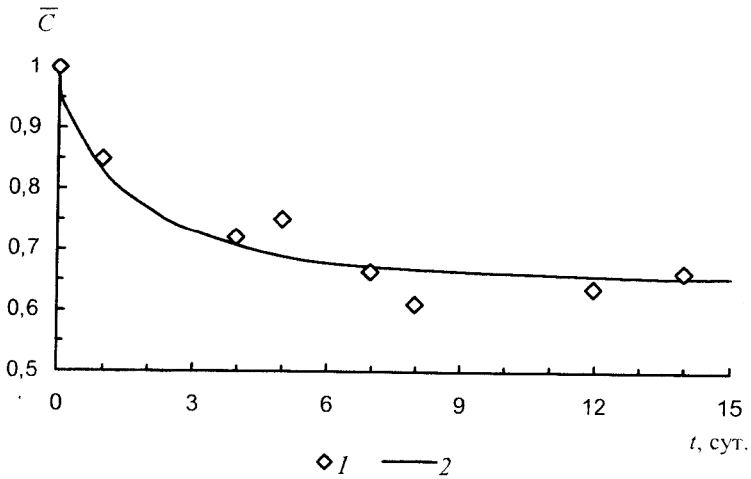


Рис. 7. График ухода KI из раствора в образец № 1.
1 – экспериментальные значения; 2 – аналитические расчеты по формуле (8).

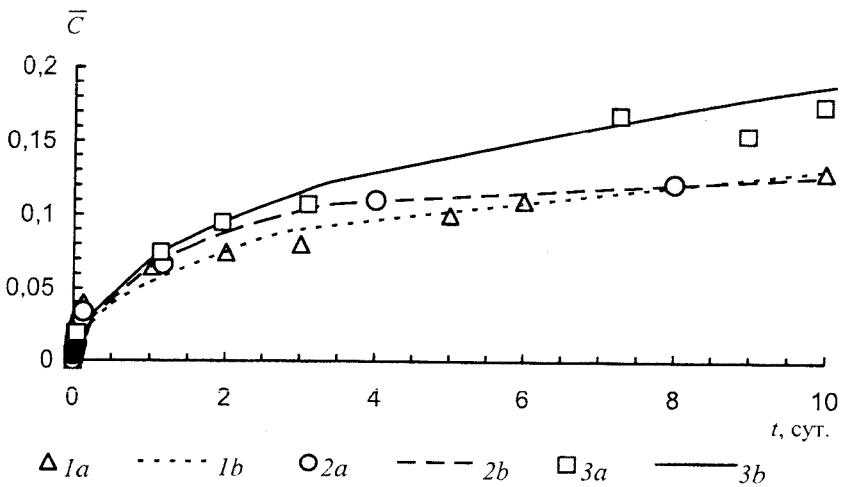


Рис. 8. График выхода KI из образца в раствор.
1–3 – образцы: 1 – № 2, 2 – № 3, 3 – № 4; а – экспериментальные значения, б – аналитические расчеты по формуле (8).

обработан наиболее лучший из них (№ 7). Для получения параметра D_M использовалось уравнение (7).

Полученные данные показывают, что в опытах с образцами № 5 и 6 уход йодида калия из камеры-источника непропорционален динамике и объему его появления в камере-приемнике. Значения концентраций в камерах-приемниках на конец опытного периода указаны в табл. 3. Динамика ухода йода из камеры отражена на рис. 9. Такое несоответствие в балансе масс в двух камерах объясняется возможным процессом окисления йода кислородом под воздействием ионов железа в аргиллитах, выполняющих роль катализатора. Между

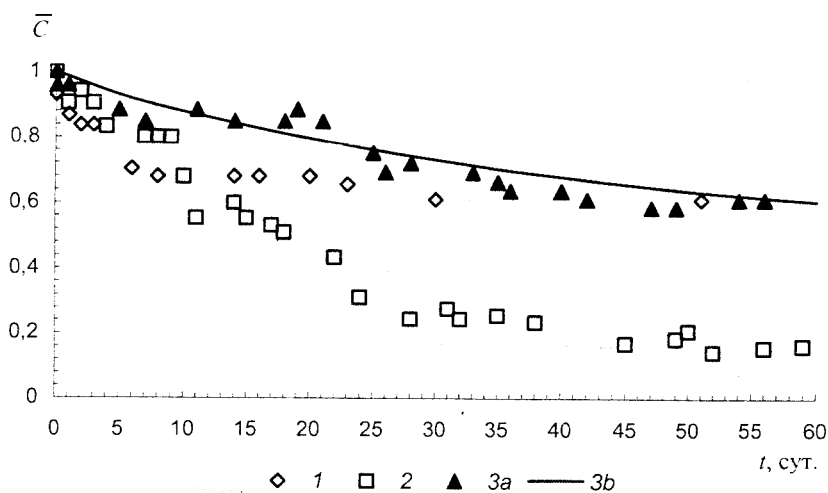


Рис. 9. Динамика ухода KI из камеры-источника диффузионной ячейки.
 1-3 — образцы: 1 — № 5, 2 — № 6, 3 — № 7; а — экспериментальные значения,
 б — аналитические расчеты по формуле (7).

тем йодидселективный электрод не в состоянии зафиксировать окисленный йод в камере. Результат обработки для образца № 7 приведен в табл. 2.

Таблица 3. Значения относительных концентраций в обеих камерах диффузионной ячейки на конечный момент времени

№ образца	t_k , сут.	\bar{C}_1^∞	\bar{C}_2^∞
5	51	0,61	0,23
6	101	0,15	0,02
7	56	0,61	0,04

Примечание. t_k — время завершения экспериментов; \bar{C}_1^∞ и \bar{C}_2^∞ — относительная концентрация соответственно в камере-источнике и камере-приемнике диффузионной ячейки.

Обобщая полученные результаты, можно отметить, что средний параметр молекулярной диффузии для микулинских глин и аргиллитов падунского горизонта составил соответственно $4,29 \cdot 10^{-5}$ м²/сут. (для глин) и $7,19 \cdot 10^{-5}$ м²/сут. (для аргиллитов). Между тем, по мнению авторов, наиболее чистые условия эксперимента соблюдались при работе с образцом № 4 (глина), для которого $D_M = 9,16 \cdot 10^{-5}$ м²/сут.

Заключение. Подробный анализ фактического материала показал, что схема формирования Бобровского участка Северодвинского месторождения йодных вод является уникальной в своем роде, основной особенностью которой служит отсутствие температурной стадии преобразования йодсодержащих морских водорослей. Несомненной является генетическая связь месторождения с мощной толщей микулинских глин четвертичного возраста, содержащей в большом количестве захороненную органику. Также неоспоримым является тот факт, что данное месторождение — самое молодое из всех известных: его возраст составляет порядка 10 тыс. лет.

Основываясь на палеогидрогеологическом анализе, была произведена схематизация условий формирования месторождения. Были выделены основные этапы и механизмы, ответственные за процесс его образования. На основе схематизации была построена эпигнозная модель разрушения месторождения.

Проведенный комплекс лабораторных экспериментов над отобранными образцами пород позволил получить параметры молекулярной диффузии для микулинских глин ($4,29 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сут.}$) и аргиллитов ($7,19 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сут.}$) падушского комплекса.

Построение аналитической модели в комплексе с лабораторными экспериментами по определению диффузионных свойств пород дало возможность провести количественную оценку процесса разрушения месторождения. Было установлено, что одну из определяющих ролей в формировании месторождения сыграли диффузионные процессы.

Авторы благодарят Ф. Г. Атрошенко, А. И. Короткова, А. П. Титенко, А. И. Малова за предоставленные фактические материалы, а также заведующего кафедрой гидрогеологии А. Н. Воронова за возможность проведения лабораторных экспериментов.

Summary

Mironenko A. V., Mironova A. V., Ruminin V. G. The quantitative assessment of the diffusion processes contribution in the formation of Severodvinskoe iodine groundwater deposits (the Arkhangelsk Region).

The article is dedicated to the analysis of formation and destruction conditions of "Severodvinskoe" iodide water field (the Arkhangelsk region). The main peculiarity of the forming process is that it wasn't connected with catalytic thermal treatment of organic matter. Because of that, it is the only of known iodide water fields, which is situated on shallow depth, which is connected with low- temperature solutions, and which is rather young (about 10 thousand years). The article consists of the detailed analysis of the field data; the results of laboratory diffusion experiments, conducted by the author and the example of quantitative assessment of the destruction process. The main result of the survey is that one of the mechanisms, which promoted field foundation and regeneration is the process of molecular diffusion of attenuated substance.

Литература

1. Кирюхин В. А., Швец В. Г. Процессы формирования йодных вод. М., 1980.
2. Кудельский А. В. Гидрогеология, геохимия йода. Минск, 1976.
3. Коротков А. И., Павлов А. Н. Гидрогеохимический метод в геологии и гидрогеологии. Л., 1972.
4. Малов А. И. Подземные воды Юго-Восточного Беломорья. Екатеринбург, 2003.
5. Мироненко В. А., Румынин В. Г. Опыт-миграционные работы. М., 1983.
6. Румынин В. Г. О теоретических моделях миграции в гетерогенных средах // Моделирование в гидрогеологии и инженерной геологии / Отв. ред. Э. И. Ткачук. Новочеркасск, 1983.
7. Осипов В. И., Соколов В. Н., Румянцева Н. А. Микроструктура глинистых пород. М., 1989.
8. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел / Пер. с англ.; Под ред. А. А. Померанцева. М., 1964.
9. Рошаль А. А. Полевые методы определения миграционных параметров. М., 1981.
10. Гуревич В. И. Калий в водах Северодвинского артезианского бассейна // Труды Всесоюз. геол. ин-та. 1963. Т. II.

Статья поступила в редакцию 21 ноября 2005 г.