

ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОДОИСТОЧНИКОВ РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Д. А. Соловьёв¹✉, А. А. Дементьев¹, Н. М. Ключникова², Н. И. Прохоров³

¹ Рязанский государственный медицинский университет имени И. П. Павлова, Рязань

² Центр гигиены и эпидемиологии в Рязанской области, Рязань

³ Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова (Сеченовский университет), Москва

Среди факторов, влияющих на здоровье населения, кроме социально-экономических, большую роль играют состояние окружающей среды, условия быта, питание, водоснабжение. Обеспечение населения доброкачественной питьевой водой является важнейшим направлением социально-экономического развития России. Целью работы было охарактеризовать подземные водоносные горизонты, используемые для централизованного питьевого водоснабжения населения Рязанской области, и провести сравнительный анализ химического состава их артезианских вод. Материалом исследования служили данные о качестве воды водоносных горизонтов Рязанской области, полученные при совместной работе с ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Рязанской области». Использовали метод сравнительного анализа. Статистическую обработку проводили методом дисперсионного анализа. Чаще всего в районах Рязанской области для водоснабжения населения используются Каширский и Озерско-Хованский водоносные горизонты, на долю которых приходится соответственно 30,7 и 27,3% скважин от их общего количества. Окско-Тарусский и Подольско-Мячковский водоносные горизонты используются реже (21 и 18,9% скважин соответственно). Доля наиболее редко используемого Касимовского водоносного горизонта в целом по Рязанской области составляет 2,1%. Хотя рекомендуемый срок использования артезианских скважин составляет 25 лет, две трети из них эксплуатируются от 26 до 50 лет, а каждая четвертая скважина — более 50 лет. Вода различных горизонтов области отличается по химическому составу. По сравнению с другими водоносными горизонтами, Озерско-Хованский характеризуется более высоким содержанием железа (Fe^{2+}), концентрация которого составляет 0,7 мг/л ($p \geq 0,05$), Подольско-Мячковский и Озерско-Хованский — сульфатов, а Окско-Тарусский — ионов аммония.

Ключевые слова: водоносные горизонты, межпластовые воды, артезианские воды, химический состав, артезианские скважины

✉ **Для корреспонденции:** Давид Андреевич Соловьёв
ул. Высоковольная, 7, корп. 1, г. Рязань, 390005; soldos1@yandex.ru

Статья получена: 19.06.2018 **Статья принята к печати:** 26.10.2018

DOI: 10.24075/vrgmu.2018.055

HYGIENIC CHARACTERISTICS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF GROUNDWATER IN RYAZAN REGION

Solovyev DA¹✉, Dementiev AA¹, Kluchnikova NM², Prokhorov NI³

¹ Pavlov Rязan State Medical University, Rязan

² Center for Hygiene and Epidemiology in Rязan Region, Rязan

³ Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow

Among the factors that have a strong impact on public health the environment, living conditions, food and water quality are just as important as socio-economic forces. Providing the population with access to safe potable water has become a socio-economic priority in Russia. The aim of this work was to characterize the aquifers supplying the population of Rязan region with water for personal and domestic needs and to compare their chemical composition. Sample collection was performed in cooperation with the Center for Hygiene and Epidemiology (Rязan region). The obtained data were processed using ANOVA. The Kashirsky and Ozersko-Khovansky aquifers turn to be the most commonly used ones supplying water to 30.7% and 27.3% of the total artesian wells. The Oksko-Tarussky and Podolsko-Myachkovsky aquifers rank second, feeding 21% and 18.9% of the wells, respectively. The share of the Kasimovskiy aquifer in the total water supply is only 2.1%. Although the recommended lifespan of an artesian well is 25 years, two-thirds of the wells in Rязan region have been in service for 26 to 50 years, and one in every 4 wells is over 50 years old. The chemical composition of the groundwater drawn from different aquifers is different. High concentrations (0.7 mg/l) of iron (Fe^{2+}) are present in the water from the Ozersko-Khovansky aquifer ($p \geq 0.05$). Sulfates are found in abundance in the Podolsko-Myachkovsky and Ozersko-Khovansky aquifer. The water from the Oksko-Tarussky aquifer contains high concentrations of ionized ammonia.

Keywords: aquifers, interstitial waters, artesian waters, chemical composition of artesian waters, artesian wells

✉ **Correspondence should be addressed:** David A. Solovyev
Vysokovolnaya 7, korp. 1, Rязan, 390005; soldos1@yandex.ru

Received: 19.06.2018 **Accepted:** 26.10.2018

DOI: 10.24075/brsmu.2018.055

Среди факторов, влияющих на здоровье населения, кроме социально-экономических, большую роль играет состояние окружающей среды, в том числе качество питьевой воды [1, 2]. Обеспечение населения доброкачественной питьевой водой является важнейшим направлением социально-экономического развития России [3, 4]. Использование питьевой воды из подземных водоисточников, по сравнению с поверхностными, предпочтительнее при выборе источников для централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения [5–7]. Это связано с тем, что подземные водоисточники характеризуются более стабильным химическим составом, высокой степенью защищенности от бактериального загрязнения и высокими показателями качества по органолептическим параметрам [8, 9]. В то же время в подземных водах может наблюдаться превышение допустимых концентраций химических веществ, что связано с особенностями пород, формирующих водоносный горизонт [10, 11]. В Рязанской области в большинстве районов для централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения используются воды подземных водоносных горизонтов [12–15]. Таким образом, необходимость подтверждения пригодности использования подземных вод в качестве источников централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения особенно актуальна. Целью исследования было дать сравнительную характеристику химического состава воды подземных водоисточников, используемых для централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения в районах Рязанской области, а также провести сравнительный анализ частоты использования отдельных водоносных горизонтов и распределения артезианских скважин по глубине и срокам эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом исследования служили данные о качестве воды водоносных горизонтов Рязанской области. Отбор проб проводили из каждой скважины совместно с ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Рязанской области» один раз в сезон в соответствии с СанПиН 2.1.4.1074-01 [14] в период с 2010 по 2015 годы. Пробы воды исследовали на базе санитарно-химической лаборатории ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Рязанской

области». С помощью метода сравнительного анализа изучали санитарно-химические показатели проб воды (содержание железа, сульфатов, ионов аммония), а также эксплуатационные характеристики скважин (глубину, срок эксплуатации). Результаты обрабатывали методом дисперсионного анализа с использованием компьютерной программы Statistica 6.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На сегодняшний день в области функционирует 291 скважина в различных горизонтах. При этом на долю Каширского и Озерско-Хованского водоносных горизонтов приходится 30,7 и 27,3% от общего их числа. Несколько реже используются Окско-Тарусский и Подольско-Мячковский водоносные горизонты, доля скважин в них составляет 21 и 18,9% соответственно. Реже всего в качестве подземного источника водоснабжения задействован Касимовский водоносный горизонт, на его долю приходится всего 2,1% скважин.

Существенным фактором, определяющим качество питьевой воды, является глубина забора подземных вод. Нами был проведен анализ структуры эксплуатируемых артезианских скважин в Рязанской области в зависимости от их глубины. Полученные данные свидетельствуют, что почти две трети действующих скважин в Рязанской области имеют глубину более 150 м, каждая четвертая скважина пробурена на 100–150 м и только из 15% скважин осуществляют водозабор с глубины до 100 м (рис. 1).

Максимальные (более 100 м) глубины скважин характерны для Озерско-Хованского и Касимовского водоносных горизонтов, удельный вес скважин данных водоносных горизонтов составил соответственно 64 и 66% от общего числа скважин каждого горизонта. Глубины скважин до 50 м характерны для Окско-Тарусского водоносного горизонта, на их долю приходится 47,8%.

Для прогнозирования санитарного состояния скважин и качества воды водоносных горизонтов важное значение имеет срок эксплуатации скважин. Рекомендуемый срок службы артезианских скважин составляет 25 лет [13]. Проведенный нами анализ длительности эксплуатации по горизонтам показал, что в Рязанской области для



Рис. 1. Структура артезианских скважин по глубине в зависимости от используемого водоносного горизонта

водоснабжения населенных пунктов используются скважины, эксплуатируемые от 26 до 50 лет, и их доля составила более 60% (табл. 1). Примерно каждая четвертая скважина эксплуатируется более 50 лет, тогда как на долю скважин со сроком эксплуатации до 25 лет приходится 14,8%.

Выявленная закономерность характерна для большинства водоносных горизонтов, за исключением Касимовского, две трети скважин которого эксплуатируются 25 лет, тогда как остальные имеют срок службы 26–50 лет.

При анализе химического состава подземных вод установлено, что общая минерализация колебалась от 0,2 до 0,9 г/л. В Озерско-Хованском, Окско-Тарусском и Подольско-Мячковском водоносных горизонтах выявлены достоверные статистические различия по содержанию некоторых химических веществ. В частности, содержание железа в Озерско-Хованском водоносном горизонте составляет в среднем 0,7 мг/л ($p \geq 0,05$), что не соответствует требованиям ГН 2.1.5.1315-03 (0,3 мг/л), при этом процент нестандартных проб составил 40%, а концентрации данного элемента определялись в пределах от 0,035 до 8,22 мг/л [5]. Среднее содержание ионов аммония в воде водоносных горизонтов в Окско-Тарусском водоносном горизонте достоверно отличалось от содержания в Каширском, Касимовском и Озерско-Хованском водоносных горизонтах. Необходимо также отметить, что среднее содержание сульфатов в Окско-Тарусском водоносном горизонте отличалось от средних значений в других водоносных горизонтах и составило 113,9 мг/л ($p \geq 0,05$), при этом минимальная концентрация равнялась 0,3 мг/л, а максимальная достигала 810 мг/л. Достоверных статистически значимых различий не наблюдалось по таким веществам, как фториды, магний, марганец, бром, бериллий, хлориды.

По содержанию железа, сульфатов и ионов аммония в воде скважин водоносные горизонты имеют существенные различия (табл. 2).

Подольско-Мячковский и Озерско-Хованский водоносные горизонты характеризуются более высоким содержанием сульфатов по сравнению с другими водоносными горизонтами. Необходимо также отметить, что среднее содержание ионов аммония в Окско-Тарусском водоносном

горизонте было выше средней концентрации по сравнению с другими водоносными горизонтами.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На территории Рязанской области используются воды Московского артезианского бассейна, представленные в основном каменноугольным и верхнедевонским водоносными слоями. Большая часть водоносных горизонтов Рязанской области принадлежит к каменноугольному комплексу. Воды горизонтов, которые рассматривались в данной работе, образованы при просачивании и выщелачивании гипсовых пород, поэтому состав вод в основном сульфатно-кальциевый.

Исследования показали, что пробы воды горизонтов, представленных на территории Рязанской области, имеют различия по химическому составу, обусловленные условиями их формирования [1]. Так, Озерско-Хованский водоносный горизонт отличается повышенным содержанием железа, средняя концентрация которого в воде артезианских скважин составляет 0,7 мг/л, существенно превышая аналогичные показатели в воде артезианских скважин других горизонтов ($p < 0,05$), и не соответствует требованиям ГН 2.1.5.1315-03 (0,3 мг/л) в 40% проб. Значительная доля проб воды с высоким содержанием Fe^{2+} свидетельствует о необходимости разработки мероприятий по обезжелезиванию вод этих артезианских скважин при их использовании для централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Артезианские воды Озерско-Хованского и Подольско-Мячковского горизонтов характеризуются более высоким содержанием сульфатов (125,1 и 113,9 мг/л соответственно) по сравнению с другими водоносными горизонтами, что вполне объясняется гидрогеологическими особенностями формирования этих подземных вод и процессов выщелачивания гипсовых пород при фильтрации [2]. Обращает на себя внимание тот факт, что воды Окско-Тарусского водоносного горизонта отличаются наиболее высокими (0,6 мг/л) средними концентрациями ионов аммония ($p < 0,05$). Следует отметить, что наличие ионов аммония не характерно для вод этого горизонта, может рассматриваться как косвенный показатель

Таблица 1. Распределение артезианских скважин по срокам эксплуатации в районах Рязанской области

Водоносный горизонт	Скважины с различным сроком эксплуатации, %		
	до 25 лет	26–50 лет	50 лет и более
Каширский	16,3	60,4	23,3
Озерско-Хованский	16,9	60,0	23,1
Окско-Тарусский	13,6	65,5	20,9
Подольско-Мячковский	2,6	58,0	39,4
Касимовский	64,7	35,3	0

Таблица 2. Средние концентрации ионов аммония, железа и сульфатов в воде подземных источников водоснабжения

Водоносный горизонт	$\bar{x} \pm tm$, мг/л		
	Ионы аммония	Ионы железа	Сульфаты
Озерско-Хованский	0,2 ± 0,1	0,7 ± 0,2	125,1 ± 27,9
Подольско-Мячковский	0,4 ± 0,1	0,3 ± 0,1	113,9 ± 20,4
Каширский	0,2 ± 0,1	0,3 ± 0,1	60,5 ± 8,1
Касимовский	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,2	43,4 ± 22,4
Окско-Тарусский	0,6 ± 0,1	0,4 ± 0,1	54,5 ± 6,1

Примечание: \bar{x} — средняя концентрация вещества, tm — доверительный интервал.

органического загрязнения и скорее всего связано с нарушением эксплуатации артезианских скважин [2]. В пользу версии вероятного органического происхождения ионов аммония свидетельствует тот факт, что для данного горизонта характерны более высокий процент артезианских скважин с глубиной до 50 м ($p < 0,05$), а также большая доля скважин (86,4%) со сроком эксплуатации, превышающим рекомендуемый (25 лет). Несомненно, в менее глубоких артезианских скважинах со значительным сроком эксплуатации повышен риск поверхностного загрязнения. Высокий процент применения для водоснабжения населенных пунктов области артезианских скважин с длительным сроком эксплуатации (более 25 лет) свидетельствует о необходимости разработки перспективного плана по обновлению этих скважин [16–18].

ВЫВОДЫ

В Рязанской области для целей централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения чаще всего используют подземные воды Озерско-Хованского и Каширского водоносных горизонтов. Наиболее глубокие скважины (100 м и более) преобладают в Касимовском и Подольско-Мячковском водоносных горизонтах. Подольско-Мячковский водоносный горизонт характеризуется

наибольшей долей артезианских скважин со сроком эксплуатации 50 лет и более. Водоносные горизонты различаются по максимальному содержанию отдельных химических веществ: Подольско-Мячковский и Озерско-Хованский — сульфатов, Озерско-Хованский — железа (Fe^{2+}), а Окско-Тарусский — ионов аммония. Артезианские воды Озерско-Хованского водоносного горизонта в пределах Рязанской области часто не соответствуют требованиям ГН 2.1.5.1315-03 по содержанию железа (в норме 0,3 мг/л) и требуют дополнительного обезжелезивания. Безусловно, ограниченное количество веществ, концентрации которых контролировались в воде артезианских скважин, и произвольный график отбора проб создают ряд неопределенностей в выполненном сравнительном анализе. С учетом этого представляется целесообразным провести отдельное исследование артезианских вод сравниваемых горизонтов на предмет содержания фтора и молибдена. В целом, выполненные исследования свидетельствуют о необходимости проведения анализа качества воды из водоносных горизонтов, различающихся по содержанию химических веществ, и мероприятий по ее улучшению, в частности аэрации для снижения концентрации Fe^{2+} , а также разработки перспективного плана по обновлению скважин.

Литература

1. Винокуров Ю. И., Путилова А. А. Анализ онкологической заболеваемости и ее связей с факторами окружающей среды на территории Алтайского края. География и природные ресурсы. 2013; (4): 101–6.
2. Сёмка И. М., Казаева О. В. Анализ качества питьевой воды в Рязанской области. Наука молодых (Eruditio Juvenium). 2013; (3): 71–4.
3. Зверев В. П. Влияние антропогенной деятельности на формирование химического состава подземных вод на основных уровнях гидросферы. СПб.: Недра, 2002. 159–75.
4. Недовесова С. А., Трофимович Е. М., Турбинский В. В., Айзман Р. И. Влияние длительного потребления питьевой воды с повышенным содержанием магния на функции почек у животных. Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. 2016; (2): 45–7.
5. ГОСТ 2761-84 Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические, технические требования и правила выбора (с Изменением № 1) Москва: Стандартинформ, 2006; 142.
6. ГН 2.1.5.1315-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Москва: Минздрав России, 2003; 47–105.
7. ГОСТ 31861-2012. Межгосударственный стандарт. Вода. Общие требования к отбору проб. Москва: Стандартинформ, 2013; 14.
8. Михайличенко К. Ю., Коршунова А. Ю., Курбатова А. И. Интегральная оценка качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения. Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2014; (1): 76–9.
9. Каменева М. Г., Коркина Н. А. Качество воды и здоровье населения. В сборнике: Итоги региональной конференции, посвященной 95-летию санитарно-эпидемиологической службы России. 19 ноября 2014 г.; Казань. Вестник Казанского технологического университета, 2014; (4): 87.
10. Боронина Л. В., Садчиков П. Н., Усынина А. Э., Тажиева С. З. Прогноз экологического состояния поверхностных вод Нижневолжского бассейна. Юг России: экология, развитие. 2012; (3): 28–30.
11. Галимова А. Р., Тунакова Ю. А. Поступление, содержание и воздействие высоких концентраций металлов в питьевой воде на организм. Вестник Казанского технологического университета. 2013; (20): 165–9.
12. Средние нормативные сроки службы основных фондов учреждений и организаций, состоящих на государственном бюджете. М.: Статистика, 1972: 5.
13. Позднякова М. А., Федотова И. В., Липшиц Д. А., Королева Т. А. Статистический подход к гигиенической оценке качества питьевого водоснабжения территории в динамике. Российский медико-биологический вестник им. акад. И. П. Павлова. 2011; 19 (2): 10.
14. СанПиН 2.1.4.1074-01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. Москва, 2002; 19.
15. Онищенко Г. Г. Эффективное обеззараживание воды — основа профилактики инфекционных заболеваний. Водоснабжение и санитарная техника. 2005; 12 (1): 8–12.
16. Broholm MM, Aryin E. Biodegradation of phenols in a sandstone aquifer under aerobic conditions and nitrate and iron reducing conditions. J of Contaminant Hydrology. 2000; (3): 239–73.
17. Fryar AE, Macko SA, Mullican WF, Romanak KD, Bennet PC. Nitrat reduction during ground-water recharge, Southern High Plains, Texas. J of Contaminant Hydrology. 2000; (2): 335–63.
18. Kaluarachchi JJ, Cvetkovic V, Berglund S. Stochastic analysis of oxygen- and nitrate-based biodegradation of hydrocarbons in aquifer. J of Contaminant Hydrology. 2000; (3): 335–65.

References

1. Vinokurov Jul, Putilova AA. Analiz onkologicheskoy zaboлеваemosti i ee svyazey s faktorami okruzhajushhej sredy na territorii Altajskogo kraja. *Geografija i prirodnye resursy*. 2013; (4): 101–6.
2. Sjomka IM, Kazaeva OV. Analiz kachestva pit'evoy vody v Rjazanskoj oblasti. *Nauka molodyh (Eruditio Juvenium)*. 2013; (3): 71–4.
3. Zverev VP. Vlijanie antropogennoj dejatel'nosti na formirovanie himicheskogo sostava podzemnyh vod na osnovnyh urovnjah gidrosfery. SPb.: Nedra, 2002. 159–75.
4. Nedovesova SA, Trofimovich EM, Turbinskij VV, Ajzman RI. Vlijanie dlitel'nogo potreblenija pit'evoy vody s povyshennym soderzhanijem magnija na funkcii pochek u zhivotnyh. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta*. 2016; (2): 45–7.
5. GOST 2761-84 Istochniki centralizovannogo hozjajstvenno-pit'evogo vodosnabzhenija. *Gigienicheskie, tehniczeskie trebovanija i pravila vybora (s izmenenijem № 1)*. Moskva: Standartinform, 2006; 142.
6. GN 2.1.5.1315-03 Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) himicheskikh veshhestv v vode vodnyh ob#ektov hozjajstvenno-pit'evogo i kul'turno-bytovogo vodopol'zovanija. Moskva: Minzdrav Rossii, 2003; 47–105.
7. GOST 31861-2012. Mezhgosudarstvennyj standart. Voda. Obshhie trebovanija k otboru prob. Moskva: Standartinform, 2013; 14.
8. Mihajlichenko KJu, Korshunova AJu, Kurbatova AI. Integral'naja ocenka kachestva pit'evoy vody centralizovannyh sistem vodosnabzhenija. *Vestnik RUDN. Serija: Jekologija i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*. 2014; (1): 76–9.
9. Kameneva MG, Korkina NA. Kachestvo vody i zdorov'e naselenija V sbornike: Itogi regional'noj konferencii, posvjashhjonnoj 95-letiju sanitarno-jepidemiologicheskoy sluzhby Rossii. 19 nojabrja 2014 g.; Kazan'. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 2014; (4): 87.
10. Boronina LV, Sadchikov PN, Usynina AJe, Tazhieva SZ. Prognoz jekologicheskogo sostojanija poverhnostnyh vod Nizhnevolzhskogo bassejna. *Jug Rossii: jekologija, razvitie*. 2012; (3): 28–30.
11. Galimova AR, Tunakova JuA. Postuplenie, soderzhanie i vozdejstvie vysokih koncentracij metallov v pit'evoy vode na organizm. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*. 2013; (20): 165–9.
12. Srednie normativnye sroki sluzhby osnovnyh fondov uchrezhdenij i organizacij, sostojashhij na gosudarstvennom bjudzhetе. M.: Statistika, 1972; 5.
13. Pozdnjakova MA, Fedotova IV, Lipshic DA, Koroleva TA. Statisticheskij podhod k gigienicheskoj ocenke kachestva pit'evogo vodosnabzhenija territorii v dinamike. *Rossijskij mediko-biologicheskij vestnik im. akad. IP. Pavlova*. 2011; (2): 10.
14. SanPiN 2.1.4.1074-01 Pit'evaja voda. *Gigienicheskie trebovanija k kachestvu vody centralizovannyh sistem pit'evogo vodosnabzhenija. Kontrol' kachestva. Gigienicheskie trebovanija k obespecheniju bezopasnosti sistem gorjachego vodosnabzhenija*. Moskva, 2002; 19.
15. Onishhenko GG. Jefferektivnoe obezzarazhivanie vody — osnova profilaktiki infekcionnyh zabolevanij. *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika*; 2005; 12 (1): 8–12.
16. Broholm MM, Aryin E. Biodegradation of phenols in a sandstone aquifer under aerobic conditions and nitrate and iron reducing conditions. *J of Contaminant Hydrology*. 2000; (3): 239–73.
17. Fryar AE, Macko SA, Mullican WF, Romanak KD, Bennet PC. Nitrat reduction during ground-water recharge, Southern High Plains, Texas. *J of Contaminant Hydrology*. 2000; (2): 335–63.
18. Kaluarachchi JJ, Cvetkovic V, Berglund S. Stochastic analysis of oxygen- and nitrate-based biodegradation of hydrocarbons in aquifer. *J of Contaminant Hydrology*. 2000; (3): 335–65.