

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВОДООБМЕНА НА СТЕПЕНЬ И МАСШТАБ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

© 2009 г. А. А. Ястребов

*Институт геологии и геохимии УрО РАН
620075, г. Екатеринбург, пер. Почтовый, 7
E-mail: yastrebov@igg.uran.ru*

Поступила в редакцию 11.06.2009 г.

С помощью балансовых характеристик стока проведена оценка устойчивости геосистемы к техногенному воздействию на основе выделения и обоснования параметров гидродинамически обособленных зон. Произведен расчет глубины дренирующего воздействия речной сети как важной региональной характеристики условий формирования подземного стока. Определено, что элементарные бассейны стока являются практически замкнутыми структурами без обмена веществом и энергией между собой. Движение подземных вод и миграция загрязнителей соответственно происходит на небольших расстояниях (не более 8–10 км), с полным дренажом речной сетью.

Ключевые слова: гидрогеология, геоэкология, подземные воды, водный баланс, криолитозона.

Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО) в настоящее время является наиболее интенсивно развивающимся регионом РФ. В результате добычи нефти и газа территория округа характеризуется высокой степенью антропогенного воздействия, основу которого составляет интенсивное недропользование. В итоге подземная гидросфера испытывает большое негативное влияние, которое может вызвать необратимое загрязнение и истощение ресурсов подземных вод. Все это вызывает необходимость развернутого анализа процессов формирования и техногенного загрязнения пресных вод округа. В условиях слабой гидрогеологической изученности и при масштабном освоении территории возрастает роль научных разработок, позволяющих более обоснованно проводить комплексные исследования и природоохранные мероприятия. Прогнозирование развития экологической ситуации при дальнейшем освоении региона, контроль за состоянием водных объектов создают основу для принятия решений по поддержанию ресурсов и качества подземных вод на приемлемом уровне, т.е. делает проблему оценки степени гидрогеоэкологической устойчивости эоцен-четвертичного комплекса особенно актуальной.

Термин “устойчивость” тесно связан с таким свойством как саморегулирование, т.е. способность системы к восстановлению внутренних свойств и структур под влиянием внешнего воздействия [2]. Выделение и обоснование параметров элементарных участков (или гидродинамически обособленных зон) является необходимым условием для количественной оценки устойчивости геосистемы, т.к. органическое целое характеризуется функциональной взаимосвязью данных элементарных участков,

каждый из которых обладает спецификой и вместе с тем строгой подчиненностью целому [3].

По результатам многолетних региональных исследований и в соответствии с гидродинамическими представлениями, выявлено, что основной особенностью региональной динамики подземных вод эоцен-четвертичного водоносного комплекса Западно-Сибирского мегабассейна (ЗСМБ), является формирование местных (обособленных) потоков данных вод. Гидродинамические границы (водоразделы, реки, озера) изолируют потоки подземных вод от участков выхода проницаемых отложений на поверхность, вследствие чего питание и разгрузка подземных вод осуществляется в основном путем вертикальной фильтрации. При этом закономерности фильтрации подземных вод и сроки водообмена определяются интенсивностью и глубиной эрозийного расчленения рельефа, что обуславливает в свою очередь размеры и положение участков с гидравлически открытым питанием и разгрузкой подземных вод.

Исходя из вышеизложенных теоретических предпосылок, данные участки (гидродинамически обособленные зоны) и являются элементарными бассейнами стока, в пределах которых происходит инфильтрационное питание и разгрузка подземных вод практически без транзитного стока, при этом дрены в гидродинамическом отношении представляют собой непроницаемые границы с формированием двухстороннего притока.

Важнейшей региональной характеристикой условий формирования подземного стока является понятие глубины дренирующего воздействия речной сети. Расчет дренирующего воздействия может быть получен из решения уравнения неуста-

новившейся фильтрации в полуограниченном потоке [1].

$$\frac{\partial H_0}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 H_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_0}{\partial y^2} \right)$$

При фундаментальном решении такого типа уравнений, для задач геофильтрации, рассматривается случай линейного изменения уровня на границе ($x = 0$), при этом граничные условия для ΔH будут следующие:

$$\Delta H(x, 0) = 0, \Delta H(0, t) = vt.$$

И решение для данного случая имеет вид:

$$\Delta H = vtF_v(x, t),$$

где ΔH – изменение уровней, м; v – скорость изменения уровней на границе, м/сут; t – время, сут; $F_v = R(\lambda)$ – безразмерная функция.

Считая, что $\Delta H/vt = F_v(x, t) = R(\lambda)$, получаем:

$$\lambda = \frac{x}{2\sqrt{a_0 t}}$$

отсюда глубина дренирования:

$$x = \lambda \times 2\sqrt{a_0 t};$$

x – условная глубина дренирующего воздействия, определяемая через суммарную мощность слабопроницаемых пород разреза.

Принимая предельное значение $R(\lambda)$ равным 0.9, получим для эоцен-четвертичного водоносного горизонта ЗСМБ минимальную величину глубины дренирования (при значении пьезопродности a_0 разделяющих прослоев не более 1 м²/сут) – 250 м. Необходимо отметить, что реальные коэффициенты пьезопродности, определенные в ходе опытно-фильтрационных работ на водозаборах округа, на порядок выше.

Следовательно, речная сеть, сформировавшаяся 8–9 тыс. лет назад, в начале голоцена, в настоящее время осуществляет полное дренирование подземных вод эоцен-четвертичного водоносного комплекса с формированием гидродинамически обособленных зон, зависящих в первую очередь от параметров гидрографической сети и рельефа.

Для определения порядка (величины) дрен, полностью перехватывающих подземный сток эоцен-четвертичного комплекса и формирующих элементарные бассейны стока, может быть использовано соотношение:

$$K_0 L \frac{\Delta H_e}{m_0} = T \frac{\Delta H_n}{l},$$

из которого, принимая мощность эоцен-четвертичного водоносного комплекса как глубину полного дренирования m_0 (до 250 м), можно вывести ширину области разгрузки в реку (l) и размер речной долины ($B = 2l$).

Для водоносных горизонтов в долинах рек можно считать справедливым условие $\Delta H_e/\Delta H_n < 10$, где ΔH_e – среднее значение разности напоров верти-

кальной фильтрации в области разгрузки; ΔH_n – разность напоров латерального потока в области разгрузки [1]. При средней водопродности по бассейну р. Пур около 60 м²/сут и коэффициенте фильтрации слабопроницаемых прослоев K_0 порядка 0.002–0.005 м/сут, ширина области разгрузки l составит:

$$m_0 = \frac{\Delta H_e}{\Delta H_n} \times \frac{K_0}{T} \times l^2; \quad l^2 = m_0 / \left(\frac{\Delta H_e}{\Delta H_n} \times \frac{K_0}{T} \right).$$

Отсюда ширина долины реки $B \sim 1500 \div 1600$ м.

Исходя из геоморфологии речных бассейнов ЯНАО, подобными областями разгрузки обладают реки третьего порядка (основные режимобразующие реки и ручьи).

Параметры элементарных бассейнов стока можно определить, исходя из полученных сроков водообмена для подземного стока эоцен-четвертичного комплекса [4], а также принимая во внимание данные о величинах рек, полностью дренирующих подземные воды. В условиях верхнего гидрогеологического этажа при движении подземных вод, срок водообмена связан с основными гидрогеологическими параметрами системы следующим соотношением:

$$\tau = \frac{\Delta V_{геолог}}{Q} = 365 \frac{nL^2}{\Delta HK} = \frac{L}{u},$$

где $\Delta V_{геолог}$ – объем геологических запасов подземных вод; u – действительная скорость фильтрации; ΔH – разность напоров на границах области фильтрации.

Средняя действительная скорость фильтрации по данным разведочных работ на рассматриваемой территории составляет порядка 0.08–0.1 м/сут. Таким образом, диапазон изменения L (область питания и разгрузки дрен) составит от 3–5 км в устьевых частях до 8–10 км – в истоках. Таким образом, максимальные области горизонтального транзитного стока подземных вод не превышают 8–10 км (табл. 1).

Полученные параметры крайне важны при рассмотрении геоэкологических проблем нефтегазодобывающих районов ЯНАО. Выделение элементарных бассейнов стока и определение их размеров играют существенную роль в понимании процессов техногенной трансформации подземных вод, особенно в районах интенсивной нефтегазодобычи, т.к. термодинамическое состояние геологической среды можно представить как устойчивость отдельных ее элементов.

Расчет темпов водообмена элементарных участков [4] позволяет выполнить районирование региона по степени способности к самоочищению, а определение величины средней продолжительности нахождения загрязнителя в водоносном горизонте – прогнозировать опасность контаминантов для водозаборных сооружений. С одной стороны, большие

Таблица 1. Расчет ширины области питания и разгрузки

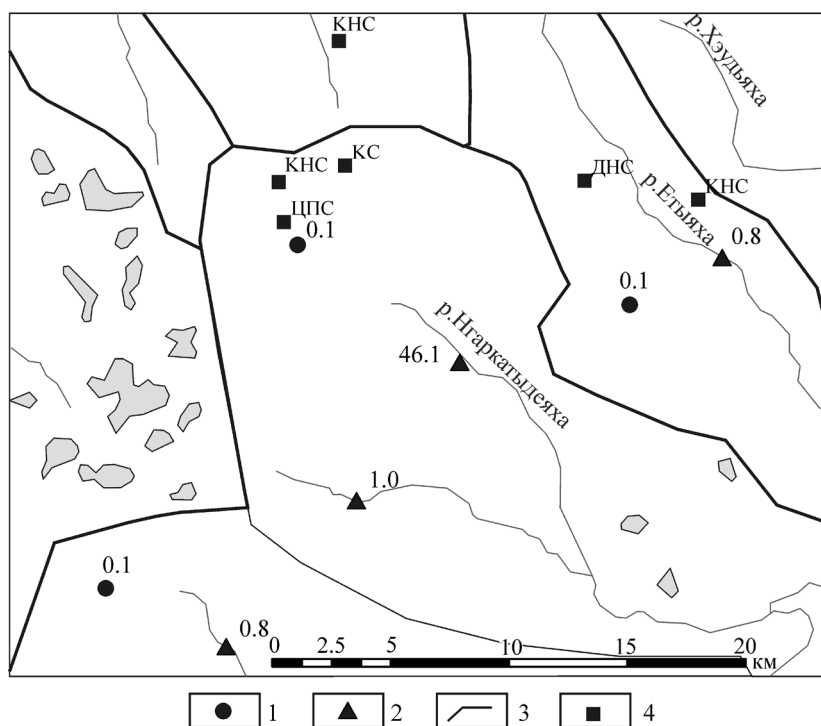
Города с близлежащими элементарными бассейнами	Коэффициент фильтрации (K_{ϕ}), м/сут	Градиент напора (U)	Скорость фильтрации (v_{ϕ}), м/сут. $v_{\phi} = K_{\phi} \times U$	Действительная скорость (u_{ϕ}), м/сут. $u_{\phi} = U_{\phi}/n_{\phi}$	Ширина области разгрузки и питания (L), м $L = v_{\text{вод}} \times 365 \times u_{\phi}$
Ноябрьск	4.3	0.004	0.017	0.09	7753
Губкинский	7.0	0.002	0.014	0.07	6029
Муравленко	10.0	0.002	0.02	0.1	8614
Тарко-Сале	11.0	0.002	0.02	0.1	8614
Н. Уренгой	10.0	0.002	0.02	0.1	3832
Надым	4.31	0.004	0.02	0.1	5548

скорости водообмена предполагают быстрый вынос загрязнения из водоносного комплекса, но с другой, – небольшие расстояния конвективного переноса определяют низкую степень естественной очистки подземных вод из-за незначительности процессов сорбции и диффузии. Здесь же необходимо отметить, что быстрый вынос загрязнителей из подземных вод приводит к превалированию процессов загрязнения поверхностных вод.

В качестве примера можно привести результаты геоэкологических исследований, проведенных на водосборных площадях изучаемых рек. Масштабное гидрохимическое опробование поверхностных и подземных вод показало, что концентрация хлора (индикатор нефтедобычи) в подземных водах в большинстве случаев не превышает фоновых зна-

чений. За небольшой отрезок времени подземные воды очищаются от загрязнителей с выносом их в речную сеть (рис. 1).

Рассмотрение региональных характеристик распределения параметров элементарных водобалансовых участков указывает, что они напрямую зависят от особенности морфологии криолитозоны. Как уже отмечалось, степень устойчивости стокоформирующих комплексов увеличивается с юга на север, коррелируя с сокращением сроков водообмена. В результате неоднократных оледенений, трансгрессий и регрессий арктического моря в четвертичный период, промерзание горных пород и типы строения мерзлых толщ имеют ярко выраженное широтное направление. При широтном увеличении мощности многолетнемерзлых пород крио-

**Рис. 1.** Содержания хлора в поверхностных и подземных водах в бассейне р. Пякупур (мг/дм³).

1 – пункты гидрохимического опробования подземных вод, 2 – пункты опробования поверхностных водотоков, 3 – границы элементарных бассейнов стока, 4 – объекты нефтегазодобычи и селитебных зон. ЦПС – центральная перекачивающая станция, ДНС – дожимные насосные станции, КНС – кустовая насосная станция, КС – компрессорная станция. Заливка серым – озера. Числа – концентрация Cl, мг/дм³.

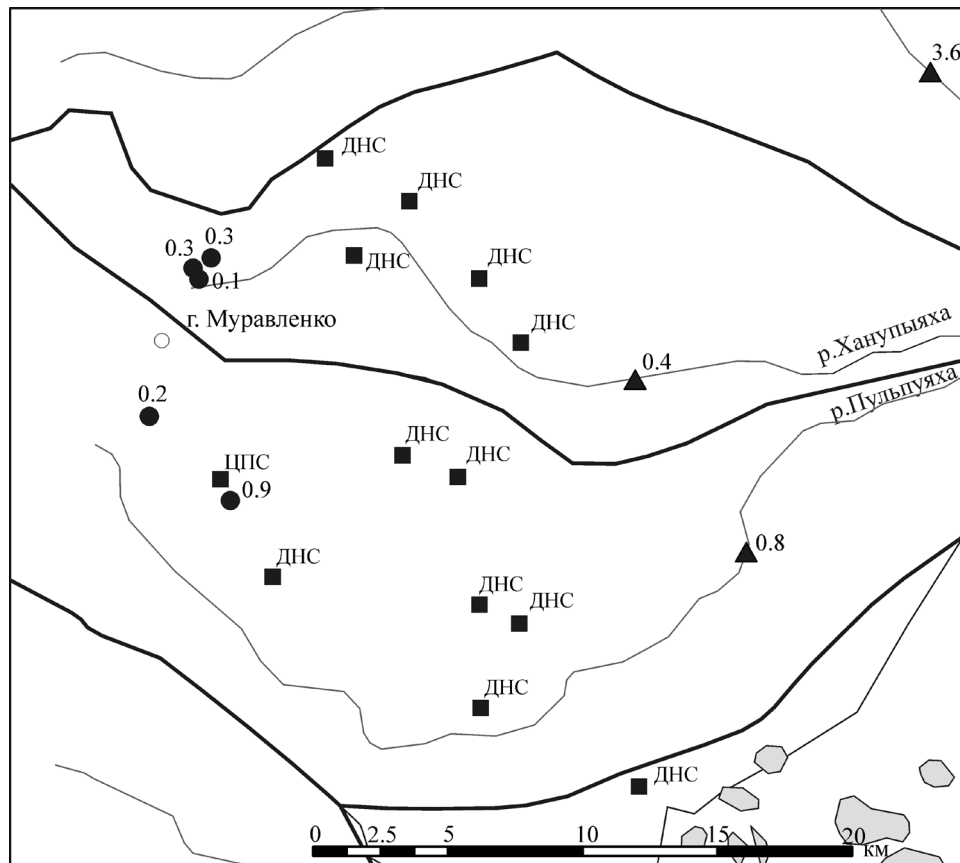


Рис. 2. Содержания хлора в поверхностных и подземных водах в междуречье рек Пульпуяха и Хануပ္яха (мг/дм³). Условные обозначения см. рис. 1.

литозоны изменяются и сроки водообмена, уменьшаются, например, для бассейна р. Пур от 250 лет на юге до 150 на севере [4]. Соответственно, повышаются скорости движения подземных вод эоцен-четвертичного водоносного комплекса.

Исходя из того, что гидродинамический и гидрохимический режимы подземных вод тесно связаны, значимые скорости движения подземных вод определяют и большой конвективный вынос загрязнителей. Кроме того, высокие скорости смены суммарного объема стока приводят к существенной проточности вмещающих пород, и, как следствие, – к малой биогенной и литогенной составляющим общей минерализации подземных вод. На фоне такой ультрапресной минерализации даже незначительный привнос загрязнителей приводит к заметному ухудшению качества подземных вод.

Учет элементарных бассейнов стока, их характеристик и величин, является необходимым условием при разработке и проведении мониторинга качества подземных вод эоцен-четвертичного водоносного горизонта. Элементарные бассейны стока являются практически замкнутыми структурами без обмена веществом и энергией между собой. Движение подземных вод и миграция загрязнителей соответственно происходит на небольших расстояниях (не более 8–10 км), с полным дренажом речной сетью.

Следовательно, при обнаружении загрязнителей в подземных водах с большой степенью вероятности следует ограничить поиски источника техногенеза радиусом 8–10 км. При этом необходимо учитывать скорость движения подземных вод и время функционирования объекта техногенной нагрузки.

Данное положение подтверждается схемой (рис. 2), из которой видно, что превышения хлора в подземных водах элементарного бассейна на междуречье рек Пульпуяха и Хануပ္яха (0.9 мг/дм³) связаны с работой центральной перекачивающей станцией (ЦПС) и не зависят от работы дожимных насосных станций (ДНС) в соседних элементарных бассейнах подземного стока.

ВЫВОДЫ

1. Особенностью гидрогеологического строения эоцен-четвертичного водоносного комплекса северной части ЗСМБ являются сформировавшиеся в постледниковый период замкнутые элементарные бассейны подземного стока, в пределах которых происходит инфильтрационное питание и разгрузка подземных вод практически без транзитного потока, при этом дрены в гидродинамическом отношении представляют собой непроницаемые границы с формированием двухстороннего притока.

2. С помощью балансовых характеристик стока проведена количественная оценка устойчивости геосистемы к техногенному воздействию на основании выделения и обоснования параметров гидродинамически обособленных зон. С одной стороны, большие скорости водообмена предполагают быстрый вынос загрязнения из водоносного комплекса, но с другой – небольшие расстояния конвективного переноса определяют низкую степень естественной очистки подземных вод из-за незначительности процессов сорбции и диффузии. Здесь же необходимо отметить, что быстрый вынос контаминантов из подземных вод приводит к преобладанию процессов загрязнения поверхностных вод.

3. Элементарные бассейны обладают высокой степенью устойчивости к антропогенному воздействию за счет высоких скоростей водообмена и полного дренирования речной сетью.

4. Отсутствие регионального стока предполагает ограничение миграции контаминантов на расстояния, не превышающие 10–15 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Всеволожский В.А.* Подземный сток и водный баланс платформенных структур. М.: Недра, 1983. 167 с.
2. *Запольский А.Н.* Гидрогеологические условия Рыбинского артезианского бассейна и его устойчивость к техногенному воздействию. Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Томск, 2004. 20 с.
3. *Росновский И.Н., Копысов С.Г.* Внешние воздействия и типы устойчивости почв // Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям. Тез. докл. Всерос. конф. Москва, 2002. С. 11–12.
4. *Ястребов А.А., Иванов Ю.К.* Региональная динамика пресных подземных вод Ямало-Ненецкого автономного округа // Литосфера. 2008. № 5. С. 99–112.

Рецензент С.Н. Тагильцев

Influence of water exchange speed on the degree and scale of anthropogenous effect

A.A. Yastrebov

Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS

A quantitative estimation of geosystem stability to technogenic influence on the basis of allocation and a substantiation of elementary sites parameters by means of drain balance characteristics were carried out. A calculation of surface-water drainage depth as important regional characteristic of underground drain formation was made. It was defined, that elementary drain pools are practically closed structures without an exchange of substance and energy among them. Movement of underground waters and pollutant migration occurs on a small distances (no more than 8–10 km), with a full drainage by a river network.

Key words: *hydrogeology, geoecology, groundwater, water balance, cryolitozone.*