

Е. А. Вивенцова

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОДЗЕМНОГО СТОКА В ФИНСКИЙ ЗАЛИВ

Разгрузка подземных вод является одним из наименее изученных элементов водного баланса поверхностных водоемов. При этом она играет немаловажную роль в создании экологической обстановки береговой зоны.

Подземные воды, разгружающиеся в моря, озера, реки, как впрочем, и все элементы геологической среды, испытывают в настоящее время значительную антропогенную нагрузку, что вызывает их загрязнение. Однако при прогнозе изменений состояния экосистемы этот элемент зачастую игнорируется, как возможный источник поступления загрязнения.

Масштабы разгрузки подземных вод определяются величиной подземного стока. Под подземным стоком понимается движение подземных вод от областей питания к областям разгрузки. Он количественно оценивается в кубических метрах в год. А параметр, характеризующий средний объем подземных вод, стекающих с единицы площади подземного водосбора (расход разгружающихся подземных вод), получил название модуля подземного стока $[(л/с) \cdot км^2]$. Таким образом, общая количественная оценка подземного стока может быть дана по величине среднегодового модуля подземного стока.

Часто в силу технических сложностей характеристика подземного стока в море имеет лишь приблизительный характер. Для ее уточнения может быть применен комплекс разнообразных методов исследования, наиболее полный обзор которых приведен в работе И. С. Зекцера [1].

Рассмотрим методы оценки подземного стока в Финский залив, который обладает рядом особенностей: 1) удаленностью от открытого океана и изолированностью залива, в связи с чем наблюдается слабый водообмен с океаном; 2) низкой соленостью воды, так как в него впадает мощная река Нева с расходом $2530 м^3/с$; 3) мелководностью; 4) урбанизированностью побережья; 5) наличием дамбы, отгородившей часть залива от акватории Балтийского моря.

Поэтому при исследовании подземного стока в Финский залив существующие методы необходимо адаптировать к условиям залива. Прежде всего следует разделить методы исследования на две группы: для водосборной части суши и для акватории. Первые предусматривают анализ геологических и гидрогеологических условий прибрежной части суши. К ним относятся гидродинамический, гидролого-гидрогеологический, метод многолетнего водного баланса подземных вод, моделирование. Среди методов, используемых в акватории, выделяются методы обнаружения и изучения участков разгрузки подземных вод в акватории путем поиска различных аномалий в морской воде или придонной части (аэрокосмические, геофизические, методы поисков гидрохимических, газохимических или температурных аномалий). По своему масштабу методы оценки подземного стока могут быть подразделены на региональные и локальные, а по степени контакта с подземным стоком — на прямые и косвенные. Кроме того, часть методов позволяет только выявить расположение зон разгрузки, а другая направлена на количественную оценку стока.

На первых этапах исследования целесообразно применение региональных методов: геолого-гидрогеологических, геофизических, геоморфологических и методы дистанционного обнаружения разгрузки. При детализации исследований следует использовать гидродинамические методы, а также термометрические, гидрохимические, газогидрохимические. На основе полученных таким образом данных определяют локализацию зон разгрузки, строят динамические и фильтрационные модели.

Геоморфологические методы дают возможность детально исследовать рельеф дна водного объекта и береговой зоны, эрозионную расчлененность местности, плотность гидрографической сети территории. Анализ геоморфологических данных предоставляет возможность оценить взаимосвязь подземных вод с поверхностными и интенсивность разгрузки (подземный сток) подземных вод.

Области питания подземных вод часто приурочены к возвышенным участкам суши. Следовательно, подземный сток увеличивается с высотой местности, т.е. интенсивность разгрузки подземных вод тем выше, чем больше разница высот береговой зоны и дна моря.

В рамках исследования анализировались геоморфологическое строение и формирование бассейна стока Финского залива от финско-российской до эстонско-российской границы. По высотным отметкам рельефа водосборной части суши и расположению водоразделов была околонтурена область, в пределах которой по геологическому и гидрогеологическому строению выделены следующие зоны формирования подземного стока: Северная (№1), Карельская (№2), Петербургская (№3) и Южная (№4). Так, например, в Карельской зоне была выявлена связь между рельефными изменениями и разгрузкой

подземных вод. Разгрузка подземных вод осуществляется в местах понижения рельефа, погребенных долин, тектонических нарушений.

Для вод верхней гидродинамической зоны — зоны наиболее интенсивной разгрузки подземных вод — была определена ширина зон, которая в первую очередь зависит от рельефа и составила: для зоны №1 — 2,5 км, для зоны №2 — 20 км, для зоны №3 — 20 км, для зоны №4 — 50 км.

Территория зоны №4 охватывает северную половину площади Ижорского плато, что служит одним из факторов выбора ширины зоны. Согласно Л. Е. Грейсеру, примерно половина объема подземных вод Ижорского плато стекает в сторону Финского залива в виде родникового стока [2]. Ширина зоны №1 обусловлена размерами бассейна стока пород кристаллического фундамента, который тянется относительно узкой полосой вдоль побережья Финского залива. Для территории большого Санкт-Петербурга, с определенной долей условности, принято, что 50% подземных вод расходуется на питание рек (р. Невы и ее притоков) в пределах городской территории, а оставшиеся 50% идут на субаквальную разгрузку в акваторию залива. В связи с этим ширина зоны №3 составила половину территории Санкт-Петербурга. Определение ширины зоны №2 опирается на рельеф Карельского перешейка, т.е. зона околунурена по высотным отметкам местности.

Следует отметить, что оценка подземного стока проводилась для верхней гидродинамической зоны, т.е. для тех горизонтов, которые простираются выше уровня базиса эрозии. Горизонты, которые расположены ниже этого уровня, (т.е. нижнекотлинский горизонт венда и, частично, межморенный горизонт четвертичных отложений) в настоящее время вряд ли могут разгружаться в залив, так как их пьезометрические уровни находятся ниже уровня моря из-за интенсивного водоотбора. Оценка площадей бассейнов подземного стока и их районирование позволяют определить общую величину подземного стока по средним значениям модуля подземного стока.

Следующий этап оценки подземного стока заключается в уточнении расположения зон разгрузки с помощью геофизических исследований и анализа геофизической информации (данные о расположении дизъюнктивных нарушений, литологическом составе донных осадков, наличии зон повышенной фильтрационной проницаемости). Так, при анализе литолого-фациальных карт дна залива были выявлены области локализации зон возможной разгрузки подземных вод.

На основе полученных геофизических данных была построена карта тектонических нарушений территории. Как уже было отмечено, наличие тектонических разломов служит индикатором разгрузки подземных вод. Для исследуемой территории такие нарушения установлены как в береговой зоне, так и в пределах акватории.

В районе Сестрорецка и Зеленогорска была зафиксирована разгрузка подземных вод в акваторию залива в пределах распространения погребенных долин и тектонических нарушений.

Анализ геофизических данных неразрывно связан с обзором геологической информации, или другими словами, с использованием геолого-гидрогеологических методов оценки подземного стока.

Согласно геолого-гидрогеологическим данным, бассейн стока в Финский залив, занимающий площадь более 280 000 км², расположен на стыке двух крупных структур — Балтийского щита и Русской платформы. В геологическом разрезе выделены: кристаллический фундамент архей-протерозойского возраста, осадочный чехол вендско-палеозойского возраста, сложенный песчаниками, алевролитами, карстующимися известняками, и четвертичный покров. Все водоносные горизонты территории (архей-протерозойский, нижнекотлинский, кембро-ордовикский, ордовикский горизонты и горизонты четвертичных отложений) прямо или косвенно разгружаются в Финский залив (табл. 1).

Таблица 1. Вклад разгружающихся водоносных горизонтов в общий водный баланс Финского залива

№ зоны	Разгружающийся водоносный горизонт	Доля разгрузки (по объему), %	Доля ионного стока (по объему), %
1	AR-PR	5,2	1,72
2	Q (грунтов., межмор.)	25,4	11,2
3	Q (грунтов., межмор.)	17,4	30,67
4	Q (грунтов.), O, Cm-O, Cm	52	56,41

Информация была собрана и проанализирована на основе материала по 400 скважинам в пределах рассматриваемой территории. По этим данным оценен средний состав подземных вод, разгружающихся в залив (табл. 2).

Таблица 2. Химический состав подземных вод в пределах исследуемой территории

Водоносный горизонт	Число опред.	Rп, Бк/л	рН	Содержание макро- и микрокомпонентов, мг/л							
				Ca	Mg	Fe	Sr	Ba	Cd	NO3	Pb
Аг-Рг	10	400	7,3	14	5	0,7	0,16		0,016	0,21	0,0002
V (гдовский)	62	60	7,9	20	12	0,6	0,20	0,36			0,006
Ст	16		8,4	24	9	1,8	0,29	0,35			0,003
О	35		7,7	53	33	5,4	0,06	0,47	0,0002		0,007
Q (надмор.)	20	10	6,1	20	7	0,3			0,0001	0,24	
Q (межмор.)	44	20	7,3	17	7	1,7		0,08			

Гидродинамические методы включают определение подземного стока по данным гидрогеологической режимной информации, на основе аналитических расчетов, согласно основному закону динамики Дарси.

При изучении прибрежных зон выделяют водоносные комплексы, сток которых направлен к морю. Расчеты расхода ведут для каждого выделенного горизонта в пределах ограниченного по ширине фильтрационного потока. Удобными границами могут служить поверхностные водотоки, принимающие на себя часть подземного стока и определяющие граничные условия фильтрационного потока.

Метод расчета многолетнего водного баланса подземных вод основан на общих гидрогеологических расчетах и выражается уравнением (без учета вертикального перетекания и притока подземных вод)

$$Y = W - E,$$

где Y — подземный сток; W — инфильтрационное питание подземных вод; E — испарение подземных вод.

Для оценки испарения неглубокозалегających подземных вод может использоваться следующая формула С. Ф. Аверьянова [3]:

$$E = E_0 (1 - H/H_{кр})^n,$$

в которой E — испарение грунтовых вод, E_0 — испаряемость, H — глубина залегания грунтовых вод, $H_{кр}$ — критическая глубина залегания грунтовых вод (см), при которой $E = 0$, n — коэффициент от 1 до 3.

Ежемесячную испаряемость, согласно Н. Н. Иванову, можно выразить таким образом:

$$E_0 = 0,0018 (25 + T)(100 - d),$$

здесь T — среднемесячная температура, d — среднемесячная относительная влажность воздуха.

Таким образом, величина подземного стока может быть рассчитана по уравнению:

$$Y = W - (0,0018 (25 + T)^2 (100 - d)) ((1 - H/H_{кр})^n).$$

Инфильтрация атмосферных осадков происходит в результате перетекания через слабопроницаемые отложения и донные осадки, достигая водоносных горизонтов.

Направленность взаимосвязи подземных и поверхностных вод зависит от гидродинамических особенностей на границах и внутри рассматриваемой гидрогеологической структуры, т.е. от соотношения напоров и уровней поверхностных и подземных вод, определяющего направление движения подземных вод. На основе карт распределения напоров водоносных горизонтов в пределах водосборной части суши выделяются зоны питания и разгрузки подземных вод.

Оценка подземного стока глубоких артезианских бассейнов может быть произведена за счет решения уравнений среднесноголетнего водного баланса. Зачастую области питания и разгрузки подземных вод разбивают на расчетные балансовые участки, и величина глубокого подземного стока определяется по уравнениям

$$W = x_0 - y_0 - z_0 \text{ или } W' = y_0 + z_0 - x_0,$$

где x_0 — среднесноголетняя величина атмосферных осадков, y_0 — поверхностного стока и z_0 — испарения соответственно; W — среднесноголетняя величина инфильтрации в глубокий водоносный горизонт в области питания и W' — артезианского стока в областях разгрузки.

В пределах прибрежной части исследуемого бассейна в рамках данного метода определяются среднесноголетние значения модулей подземного стока для основных водоносных горизонтов. Умножением модуля подземного стока на соответствующие площади прибрежной зоны (сток с которых направлен в

море) вычисляется приток подземных вод в море из зон интенсивного водообмена (табл. 3). Точность расчета подземного стока при использовании этого метода зависит от объемов и представительности информации о водопроводимости водоносных горизонтов и гидравлических градиентов потоков подземных вод.

Таблица 3. Характеристика зон разгрузки

№ зоны	Длина берега, км	Ширина области питания, км	Площадь области питания, км ²	Объем разгрузки*, м ³ /год	Средняя минерализация воды, г/л	Объем ионного стока, т/год**
1	180	2,5	450	34 058	0,15	5100
2	110	20	2200	166 510	0,2	33 200
3	75	20	1500	113 529	0,8	90 800
4	180	50	9000	340 588	0,5	167 300
Всего	555		13 150	654 685		296 400

* Объем разгрузки определяется величиной модуля подземного стока (2,4 л/с), умноженной на водосборную площадь.

** Объем ионного стока соответствует произведению минерализации воды и объема разгрузки.

По результатам *аэрофотометрических исследований* (инфракрасная (ИК) съемка) могут быть установлены зоны разгрузки подземных вод. С помощью этих методов определяется интенсивность теплового излучения подстилающей поверхности акватории в ИК-диапазоне электромагнитных волн, т. е. появляется возможность изучения аномальных температурных полей, так как по оттенкам теплового ИК-изображения обнаруживают очаги разгрузки подземных вод в прибрежных областях. Разгрузка подземных вод вызывает различные аномалии в морской воде и донных отложениях, что фиксируется на снимках.

Для изучения теплового поля донных отложений (определения температурного градиента) и водной среды используются *геотермические методы*. По аномалиям теплового поля выделяют области разгрузки подземных вод. Даже слабое восходящее или нисходящее движение подземных вод, в частности их фильтрация через донные отложения морского дна, может быть причиной значительных температурных аномалий [4].

Для обнаружения выходов подземных вод в море используются методы электроразведки, с применением резистивметров (термозондов), позволяющие измерять удельное сопротивление морской воды по профилям на различных глубинах. Одновременно с измерением сопротивления регистрируют и температуру. Так, разница температурных полей подземных и поверхностных вод особенно четко прослеживается летом, когда температура вод Финского залива порядка 19–21°С, а подземных вод около 7–11°С. В утреннее время замеры температурного фона морской воды проводят на расстоянии до 180 м от берега. Путем термозондирования морских вод удалось выделить зоны разгрузки подземных вод непосредственно в акваторию Финского залива. Например, в пределах зоны №2 выявлены два аномальных поля, где электропроводимость составила 3,44–3,50 Ом, что соответствует 12–11°С. Замеры проведены по 26 профилям в пределах прибрежной акваториальной части.

Для изучения химического состава вод и донных отложений применяются *гидрохимические методы*. Анализ химического состава поверхностных вод и донных отложений позволяет выявить концентрации нехарактерных для морских вод макро- и микрокомпонентов. Так, нехарактерными для вод акватории являются повышенные концентрации Fe и Mn. То есть индикаторами зон разгрузки подземных вод в Финский залив служат Fe, Mn, содержание которых на 2 порядка выше в подземных водах, чем в морских [5].

Как разновидность гидрохимического подхода во время исследований подземного стока в Финский залив использовался радоновый метод (газохимический). Высокие концентрации радона не свойственны поверхностным водам; если же обнаружены концентрации его более 5 Бк/л, то их относят к ряду аномальных и воспринимают как индикаторы разгрузки подземных вод. Во время полевых исследований в пределах указанной территории аномальные концентрации радона в водах Финского залива не обнаружены.

Пробы морской воды для химического и газохимического анализов отбираются обычно по нескольким параллельным профилям у дна и на поверхности воды. Отбор проб производился по 26 профилям в прибрежной акваториальной части.

Таким образом, для изучения и оценки подземного стока в Финский залив использовались несколько методов: геолого-гидрогеологический, гидрохимический, радоновый (газогеохимический), геотермический и электроразведка, тепловая съемка, гидродинамические расчеты, геофизический и

геоморфологический. Специфика Финского залива не позволяет применять для изучения подземного стока расходометрические и балансовые методы, так как разгрузка подземных вод носит в основном рассредоточенный характер, а доля подземного стока в балансе вод залива невелика.

Оценка подземного стока позволяет: выявить роль подземных вод в общем балансе морских вод и определить степень их влияния на состав морской воды; установить вклад подземного стока в формирование экосистемы береговой зоны; охарактеризовать качество подземных вод с целью их использования для водоснабжения; установить степень влияния подземных вод на формирование месторождений полезных ископаемых на дне морей; модернизировать систему мониторинга и разработать меры защиты подземных вод от загрязнения.

Summary

Viventsova E.A. Research methodology of groundwater discharge estimation.

Contribution of the ground water discharge to the Gulf of Finland contamination has not sufficiently been taken into account while it is certain to be of current scientific interest. The author gives a detailed description of the estimation method offered that may be helpful in coping with the problem get unsolved. More detailed information of the methodology of the research is presented in the article. In reason of difficulties of groundwater discharge estimation could be adopted and used different mentioned methods.

Литература

1. Зекцер И. С., Джамалов Р. Г., Месхетели А. В. Подземный водообмен суши и моря. Л., 1984.
2. Грейсер Л. Е. Формирование ресурсов подземных вод Ленинградского региона // Зап. Ленингр. горн. ин-та. № 129. 1991.
3. Емельянова Е., Лукашин Н. Геохимия осадочного процесса в Балтийском море. М., 1986.
4. Огильви Н. А. Вопросы теории геотермальных полей в приложении к геотермическим методам разведки подземных вод. М., 1959.
5. Зекцер И. С. Подземные воды как компонент окружающей среды. М., 2001.

Статья поступила в редакцию 6 июня 2003 г.