

Ю.Г.Юровский*, А.В.Прусов**

**Национальная академия природоохранного
и курортного строительства, г.Симферополь,*

***Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СУБМАРИННОЙ РАЗГРУЗКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПЕРЕТЕКАНИЕМ

Субмаринная разгрузка перетеканием (СРП) – глобальный процесс, представляющий цикл подземного стока в моря и Мировой океан. СРП – один из наиболее трудно определяемых членов уравнения водного баланса приморских территорий. В работе рассмотрены методы количественной оценки этого процесса, используемые в мировой практике, а также результаты личных наблюдений Ю.Г.Юровского. Дан анализ эффективности методов оценки СРП, показаны перспективы решения проблемы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *субмаринная разгрузка, перетекание, фильтрация, изотопы, трассеры, индикаторы, аномалия.*

Субмаринная разгрузка перетеканием (СРП) представляет собой процесс вертикальной фильтрации подземных вод через современные донные отложения (перетекание). Вертикальная фильтрация может быть обусловлена разгрузкой грунтовых, аллювиальных, напорных порово-пластовых, карстовых и трещинно-жильных вод. То есть практически из всех типов водоносных горизонтов. Такой тип фильтрации неоднороден, рассеян, изменчив во времени и по площади. Наибольшая изменчивость характерна для разгрузки грунтовых вод. Перечисленные свойства создают определенные трудности её изучения и количественной оценки. Между тем СРП является самым распространенным типом разгрузки в моря и Мировой океан.

Разработки методов изучения СРП проводились независимо друг от друга во второй половине XX в. во многих странах: США, Япония, Греция, Италия и др. Значительные достижения в исследованиях СРП, опубликованные в ряде монографических изданий и многочисленных статьях были сделаны в Советском Союзе [1 – 3 и др].

С 2000 г. по инициативе Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), поддержанной ЮНЕСКО начал осуществляться пятилетний международный проект по изучению СРП «Применение ядерных и изотопных методов для характеристики субмаринного стока грунтовых вод в прибрежных зонах». Выполнение проекта осуществлялось совместно секцией Гидрологии изотопов МАГАТЭ (Вена) и Морской лабораторией окружающей среды (Монако). В работе принимали участие также девять других лабораторий из восьми стран. Компонент ЮНЕСКО включал субсидирование от Международной океанографической комиссии (МОК) и Международной гидрологической программы (ИНР). Цель проекта состояла в разработке методологии и методов количественной оценки СРП, а также разработке предложений по эффективному зональному управлению ресурсами

грунтовых вод на приморских территориях. Экспедиционные исследования проводились на пяти полигонах: Австралия (2000), о. Сицилия (2001, 2002), о. Лонг Айленд, Нью Йорк (2002), Бразилия (2003), о. Маврикий (2005) [4]. Результаты исследований широко освещались в открытой печати в виде многочисленных статей и в интернете на 36 сайтах.

В документах проекта констатируется, что явление субмаринной разгрузки грунтовых вод носит глобальный характер и проявляется на всех континентах, островах и островных системах. Выполнение проекта имеет важное научное и прикладное значение, в том числе для оценки естественных ресурсов пресных подземных вод, решения экологических и других проблем прибрежной зоны. Особенно актуально изучение СРП для регионов с засушливым климатом, напряженным водным балансом, где ощущается недостаток питьевой воды. В целом, по данным Всемирной организации здравоохранения на нашей планете более 1,2 млрд. чел. страдает от нехватки питьевой воды и еще примерно столько же пьет некачественную воду.

Обобщая опыт отечественных и зарубежных исследований, кратко остановимся на наиболее рациональных методах изучения СРП.

Оценка величины субмаринной разгрузки с помощью естественных трассеров. Величина субмаринной разгрузки подземных вод в мировой практике оценивается с помощью широкого применения радиоактивных трассирующих элементов. В наиболее масштабных гидрогеологических исследованиях последнего времени оценка проводилась двумя способами [4]. Первый способ основан на предположении, что радиоактивные элементы – трассеры содержатся только в подземных водах. Соответственно, соотношение концентраций трассеров подземных и морских вод принимается, как обогащенные к фоновым. Второй способ основан на использовании вертикальных профилей геохимического состава в осадках содержащих поровые воды. При этом постулируется, что распределение трассирующих элементов может быть описано вертикальной одномерной адвективно-диффузионной моделью. Такая модель обычно ограничивается случаем однородной среды.

В первом способе для расчетов региональной разгрузки чаще всего используются достаточно простые балансовые модели. Так, с помощью балансовых расчетов было установлено, что воды континентального шельфа вдоль юго-восточного побережья США более обогащены ^{226}Ra , чем в открытом море [5]. Наблюдался отчетливый градиент концентраций также на границе прибрежная зона – шельф. Используя оценку времени пребывания обогащенных радием вод шельфе (установившиеся условия), можно вычислить величину потока в открытое море излишков радия. Если предположить, что ^{226}Ra поступает в море исключительно за счет субмаринной разгрузки подземных вод, соответственно оценивается и величина разгрузки. Удобным дополнением к этому подходу является использование недолговечных радио-изотопов ^{223}Ra и ^{224}Ra , в частности, для оценки времени нахождения вод на шельфе.

Массовый балансовый подход может также использоваться для ^{222}Ra , с условием учета его взаимодействия с атмосферой. Доминирующим источником поступления радона в море являются подземные воды. Поэтому радон может рассматриваться в качестве естественного трассера.

Радиоактивные трассеры достаточно широко используются в гидрогеологии. Методика и техника измерения изотопов радия и радона, а также физико-математическая теория переноса этих изотопов в природных водных системах, подробно рассмотрена в известной монографии В.В.Гудзенко и В.Т.Дубинчука [6]. В последние годы изучение концентраций радона с помощью эманометра РГА-1 «Глициния» проводилось в Украине в продуктах грязевого вулканизма на объектах Керченского п-ова [7]. Автором подчеркивается важная особенность этого природного трассера – его период полураспада – 3,825 сут. Поскольку, ^{222}Ra спустя 20 суток распадается на 97 %, его концентрации могут быть зафиксированы не далее чем в 20 сут пути миграции флюида от места измерений (поверхность земли, дно моря). Полученные данные могут быть использованы при интерпретации исследований подводных проявлений грязевого вулканизма.

Дальнейшему развитию методов радиоактивных трассеров способствовало внедрение новых технологий измерения их концентраций. За рубежом, создание адсорбера *Mn – fiber* позволило обрабатывать пробы воды в 100 – 200 л в течение рабочего дня и далее измерять устойчивые изотопы ^{226}Ra и ^{228}Ra методом гамма-спектрометрии. В 2001 г. была разработана технология непрерывных наблюдений за концентрациями радона [8]. В 2005 г. создана автоматизированная мультidetекторная система для непрерывного наблюдения за концентрациями радона и нанесения их на карту [9]. С помощью шести датчиков можно получать до 12 показаний в час с точностью 10 – 15 %.

Другой способ состоит в применении гамма-лучевой спектрометрии при анализе донных отложений, а также для непрерывного анализа таких изотопов как ^{137}Cs , ^{40}K , ^{238}U и ^{232}Th в морской воде. Гаммалучевые спектрометры применяются для непрерывного стационарного и пространственного контроля радона и торона в морской воде. Таким способом, одновременно с измерением солености, температуры и приливо-отливных течений изучалась субмаринная разгрузка подземных вод у побережий Сицилии и Бразилии [10].

В качестве природного трассера для изучения субмаринной разгрузки может использоваться метан. Чаще всего это делается в комбинированных измерениях с радоном. Исследования в прибрежной зоне северо-восточной части Мексиканском заливе показали, что вблизи субмаринных источников концентрации метана и радона обратно пропорционально связаны с соленостью [11]. Концентрации трассеров измерялись в водной толще и в инфильтродетекторах в течение нескольких месяцев. При этом линейные соотношения между концентрациями трассеров и величиной разгрузки были статистически значимыми. В 2002 г. появилась новая технология непрерывного измерения метана в природных водах с помощью датчика *METS (Capsum Technologies GmbH, Trittau, Германия)*, подробные сведения о которой опубликованы в [12].

Субмаринную разгрузку подземных вод и процессы смешения разгружающихся вод с морскими можно изучать с использованием других изотопов: нерадиоактивных (^2H , ^3He , ^4He , ^{13}C , ^{15}N , ^{18}O , $^{87/88}\text{Sr}$ и др.) и радиоактивных (^3H , ^{14}C , U) [10]. В этой же работе отмечается, что в случае разгрузки солоноватых и соленых вод изотопные методы имеют определенное преимущество перед химическими. Рекомендуется также, в исследованиях по-

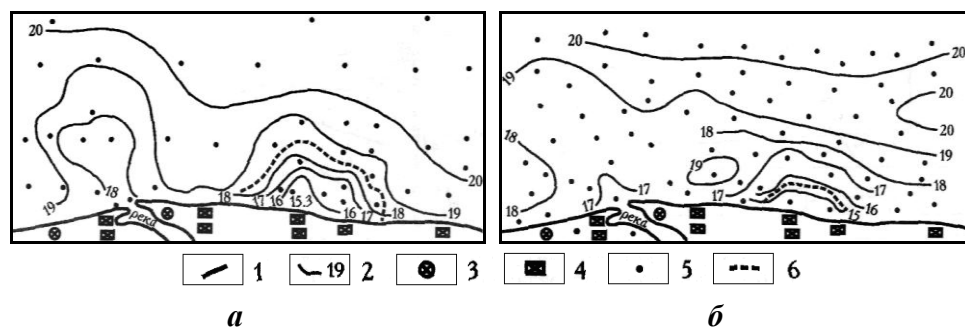
земных вод на шельфе использовать комбинации устойчивых и недолговечных изотопов, сочетание изотопных и других методов изучения.

Здесь были приведены общие, в том числе новейшие данные об использовании природных трассеров в мировой практике изучения подземных вод на шельфе. Основные разработки и наблюдения проводились сотрудниками и в лабораториях МАГАТЭ. Отечественным специалистам, безусловно, следует учитывать их опыт. Очевидно, работа с радиоактивными трассерами потребует применения специальной аппаратуры и приборов, высокой квалификации исполнителей. Возможность подобных исследований на Украинском шельфе, выбор изотопов, приборов и оборудования следует определять отдельно в каждом конкретном случае.

Оценка величины субмаринной разгрузки с помощью искусственных не радиоактивных трассеров. Искусственные трассеры в гидрогеологии используются для определения направления движения и действительной скорости движения подземных вод. Как правило, это стандартные методы, подробно описанные в учебниках. В практике таких исследований применяется три основных метода: химический, электролитический и колориметрический. В условиях суши в первом случае в качестве трассера для пресных вод может использоваться NaCl , с определениями в наблюдательных скважинах концентраций хлора или общей минерализации. Во втором случае обычно используется хлористый аммоний. Оба эти трассирующие соединения плохо определяются в морской воде, вследствие чего оба метода непригодны к применению в морских условиях.

В колориметрическом методе в качестве индикаторов используются не токсичные красители: флюоресцеин, нигрозин и некоторые другие. При исследовании субмаринной разгрузки грунтовых вод в море запуск красителя осуществляется в шурф или скважину, расположенную на берегу. Появление красителя на подводном склоне фиксируется визуально и с помощью ручных инфильтрометров. Концентрация красителя в инфильтрометрах определяется на берегу с помощью флюориметра. За рубежом используются спектрофотометры или анализаторы других типов, в том числе автоматические. Обработка материалов экспериментов осуществляется аналогично подобным работам в условиях суши с обязательным построением график $V_d = f(t)$. Определение скорости фильтрации проводится по формуле $V_f = V_d/n$, где V_f – скорость фильтрации по Дарси (м/сут), V_d – действительная скорость движения подземных вод, n – коэффициент пористости (в долях единицы) водовмещающих пород. Колориметрический метод может успешно применяться для оценки разгрузки как пресных, так и солоноватых и соленых вод. По сравнению с другими, колориметрический метод отличается простотой и невысокой стоимостью.

Опыты с запусками искусственных красителей проводились Юровским Ю.Г. при изучении субмаринной разгрузки аллювиальных вод в конусе выноса р. Псезуапсе (п. Лазаревское района г. Сочи). Верхняя часть конуса выноса на пляже и подводном склоне сложена галечно-гравийными отложениями с примесью крупно и средне зернистого песка. В таких литологических условиях с резко неоднородными фильтрационными свойствами, разгрузка аллювиальных вод происходит в виде отдельных струй по «каналам сто-



Р и с . 1 . Расположение точек запуска индикаторов и результаты морской температурной съемки: поверхностный (а) и придонный (б) слои. 1 – линия берега; 2 – изотерма; 3 – наблюдательная скважина; 4 – шурф; 5 – точка наблюдений температуры; 6 – расчетный контур СРП.

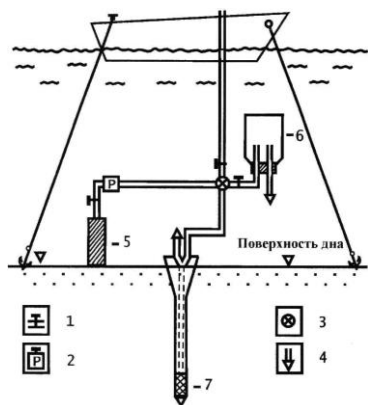
ка». Выявление «каналов стока» целесообразно осуществлять индикаторными методами. С этой целью запуски красителей (флюоресцеин, нигрозин) проводились в шурфах, отрытых на берегу (рис.1).

Измеренная действительная скорость между шурфами на берегу оказалась очень велика и составляла 100 м/сут и более. При вертикальной фильтрации через разнозернистые пески на подводном склоне в пределах расчетного контура СРП она уменьшалась до 25 – 45 м/сут. Краситель отчетливо проявлялся в виде пятен овальной формы и виде отдельных струек при подводных наблюдениях. Вблизи уреза краситель быстро достигал поверхности и наблюдался с берега визуально.

Величина СРП рассчитывалась двумя способами: по данным температурной съемки (метод теплового баланса) и по данным запусков индикаторов. В выделенном расчетном контуре расход подземных вод составил соответственно 0,229 и 0,298 м/с.

Оценка величины субмаринной разгрузки по данным гидрохимического опробования поровых растворов донных отложений. Гидрохимический метод оценки величины субмаринной разгрузки используется в тех случаях, когда применение инфильтрометров не дает положительных результатов. При слабых напорах в верхней части разреза донных отложений подземные воды смешиваются с морскими, образуя зону дисперсии. В этом случае рекомендуется проводить опробование поровых растворов, с последующим расчетом величины разгрузки.

Поровые растворы донных отложений могут быть получены двумя способами. Первый способ предусматривает отбор образцов грунта с помощью бурения, грунтовых или вибропоршневых трубок. Образцы керна из колонок грунта с интервалом 0,5 – 1,0 м далее обрабатываются в лабораторных условиях. Поровые воды извлекаются из грунта либо центрифугированием, либо с помощью специальных прессов отжимом. Далее, растворы подвергаются сокращенному химическому анализу, с обязательным определением общей минерализации (солёности), концентраций хлор-иона и двуокиси кремния. Наиболее рационально проведение обработки проб и выполнение химических анализов на борту судна (в судовых лабораториях). При отсутствии судовых лабораторий, после отделения от грунта, пробы помещаются в герметически



Р и с . 2 . Схема установки для отбора поровых вод в прибрежной зоне [13]. 1 – запорный вентиль; 2 – редуктор; 3 – трехходовой кран; 4 – лепестковый клапан; 5 – баллон с переменным давлением; 6 – емкость для отбора проб; 7 – фильтр.

закрытые стеклянные контейнеры или вместе с керном парафинируются. В таком виде они доставляются в береговые стационарные лаборатории.

Второй способ предусматривает получение поровых растворов, без отбора керна. Это могут быть откачки из мелких скважин

или откачки с помощью специальной установки (рис.2). Такого рода опробование требует изготовления оригинального оборудования, сложной технологии работ и применяется крайне редко. Приведенные сведения об этом способе носят чисто информационный характер.

Откачки выполняются в неуставившемся режиме и, в отличие от откачек проводимых на суше, не ставят целью определение гидрогеологических характеристик пласта. Задача заключается лишь в отборе пробы поровых вод.

Для выполнения расчетов величины субмаринной разгрузки необходима следующая информация: 1 – соленость (содержание хлор-иона) поровых растворов в нескольких (не менее чем в двух) интервалах опробования по разрезу; 2 – соленость морской воды в придонном слое; 3 – коэффициент диффузии соли в грунте. Расчеты [14] проводятся по уравнению:

$$AU^b = U - C, \quad (1)$$

где $a = (S_1 - S_b)/(S_2 - S_b)$, $C = (S_2 - S_1)/(S_2 - S_b)$, $b = H_1/H_2$,

$$U = \exp(-VH_1/D), \quad (2)$$

где S_1 , S_2 и S_b – соленость в интервалах 1,2 и соленость воды в придонном слое водоема; H_1 и H_2 – глубина интервалов 1 и 2.

Относительная контрастность в интервалах 1 и 2 $K = |(S_1 - S_2)/S_b|$ не должна быть меньше 0,1. Для этого, интервалы следует выбирать на глубине, не превышающей 2 – 3 м, при указанном выше расстоянии между интервалами 0,5 – 1,0 м. Малая контрастность свидетельствует о двух крайних случаях: 1) слишком малая скорость фильтрации (порядка 10^{-5} м/сут) или отсутствие фильтрации; 2) слишком большая скорость фильтрации (более 10^{-3} м/сут).

Как при очень малых, так и при очень больших скоростях фильтрации определение величины субмаринной разгрузки не представляется возможным. Поэтому, пределы применимости гидрохимического метода определяются как:

$$10^{-5} \text{ м/сут} < V < 2 \cdot 10^{-3} \text{ м/сут}. \quad (3)$$

Уравнение (1) целесообразно решать итерациями:

$$U_{i+1} = a U_i^b + C \text{ при } i = 0, 1, \dots, n, \quad U_0 = C. \quad (4)$$

Решение заканчивается, когда

$$|U_{i+1} - U_i^b - C| < 0,01. \quad (5)$$

Определение величины субмаринной разгрузки перетеканием за пределами применимости гидрохимического метода выполняются следующим образом. При больших скоростях фильтрации возможно использование инфильтрометров. При очень малых скоростях фильтрации решается самостоятельная задача. По существу, скорости фильтрации порядка 10^{-5} представляют собой нижний предел применимости закона Дарси. В механизме разгрузки в этом случае главную роль играют не процессы фильтрации, а диффузионно-осмотические процессы. С помощью гидрохимических данных можно рассчитать разгрузку в виде диффузионного потока

Методы прямых измерений величины вертикальной фильтрации.

Для выполнения прямых измерений величины субмаринной разгрузки перетеканием необходимо специальное оборудование. Его следует заранее изгото-

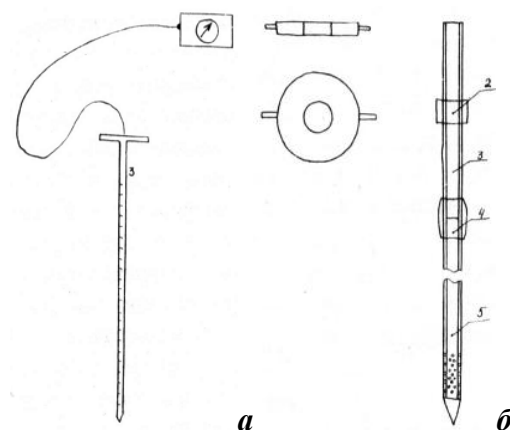


Рис. 3. Оборудование для измерения вертикальной фильтрации подземных вод в прибрежной зоне (ИВП РАН) [13]: игольчатый зонд (а): 1 – измерительный блок; 2 – кабель; 3 – зонд; игольчатый фильтр (б): 1 – ударный груз; 2 – опора; 3 – штанга; 4 – муфта; 5 – фильтр.

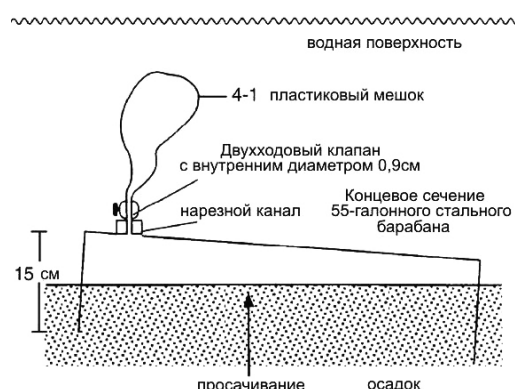


Рис. 4. Эскизная схема инфильтрометра ручного типа (Lee-типа) [15].

готовить, поскольку стандартного серийного производства в мире не существует. Наиболее успешно зарекомендовали себя простые в эксплуатации приспособления для измерений в различных геологических условиях прибрежной зоны, разработанные Институтом водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН), показанные на рис.3.

К простым измерителям величины вертикальной фильтрации относятся инфильтромеры ручного типа различных конструкций. На рис.4 показана схема инфильтрометра Lee-типа, применяемого в ряде зарубежных стран [14].

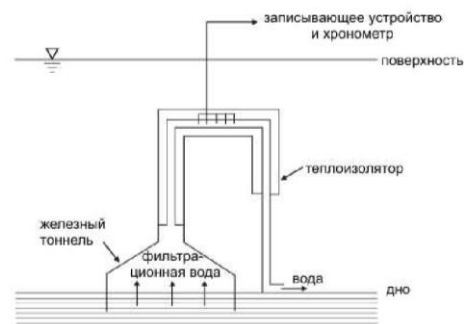
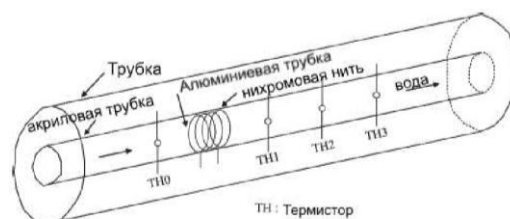
В первом варианте инфильтрометр представлял из себя стальной цилиндр (барабан), который открытым концом вставлялся в донный осадок. Вода, фильтрующаяся через осадок, перемещает воду, заключенную в резервуаре барабана, через порт в пластиковый мешок. Изменение в объеме воды в мешке через заданные промежутки времени обеспечивает измерение величины фильтрации. В дальнейшем при изготовлении инфильтрометров менялись его размеры и вносились некоторые не принципиальные изменения в его конструкцию.

Опыт исследований субмаринной разгрузки позволил сделать ряд методических замечаний к использованию инфильтрометра [10]: 1) необходимо устанавливать много измерителей фильтрации из-за природных пространственных и временных различий в интенсивности потока фильтрации; 2) сопротивление трубки соединяющей барабан с мешком должно быть минимизировано; 3) желательно предусмотреть защиту для пластиковой сумки от волнения и течений; 4) сумка изначально должна содержать определенный (измеренный) объем воды для возможности оценки позитивной или негативной фильтрации; 5) накладываются ограничения для предела измерения фильтрации, т.е. несколько см^3 на см^2 в сутки; 6) существуют неопределенности в оценке величины инфильтрации вследствие изменения градиентов давления.

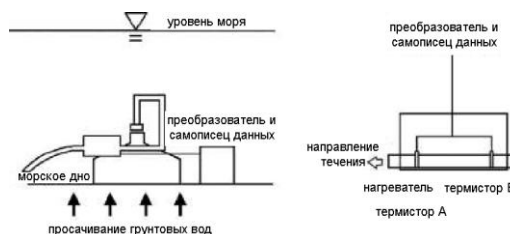
Массовое использование ручных инфильтрометров очень трудоемко. С целью уменьшения трудозатрат и получения непрерывной информации о процессе разгрузки были изобретены приборы автоматического измерения фильтрации (АИФ). В основу конструкций приборов АИФ закладывались разные принципы: пульсаций высокой температуры, непрерывной высокой температуры, ультразвуковых импульсов.

АИФ Танигучи типа (*Taniguchi tipe*) основан на времени прохождения пульсаций высокой температуры по узкой трубе. В устройстве используется последовательность термисторов в верхней части перевернутой воронки, перекрывающей заданную часть осадка (рис.5). Индукционным нагревателем служит спираль из нихрома. Система калибруется в лаборатории и затем может выполнять измерения с интервалом в 5 минут.

В 2001 г. с участием того же автора было разработано другое устройство – «автоматический измеритель фильтрации типа постоянной высокой температуры». Эта модель позволяет измерять температурный градиент водного потока между датчиками А и В в трубке диаметром 1,3 см. Когда движения воды в трубке нет, разница температур между датчиками максимальна. Соответственно Δt пропорционально уменьшает-



Р и с . 5 . Принципиальная схема автоматического измерителя фильтрации Танигучи типа [16].



Р и с . 6 . Схема автоматического измерителя инфильтрации типа «постоянной высокой температуры» [10].

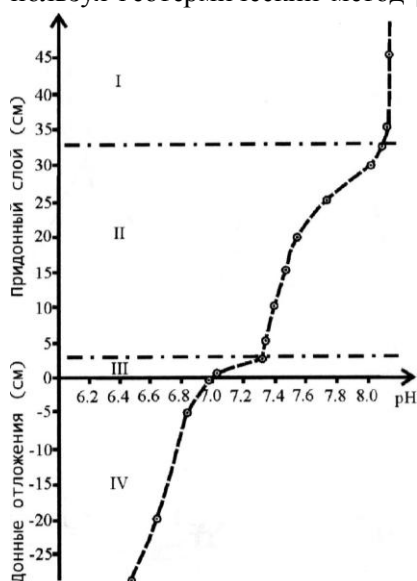
ся с увеличением скорости потока. Принципиальная схема устройства Та-нигучи и Ивакава [17] показана на рис.6.

Более сложным в техническом отношении является устройство для непрерывного измерения фильтрации с помощью ультразвуковых измерений [18]. Однако, оно имеет некоторые преимущества перед другими типами приборов. Поскольку скорость звука в воде зависит от солености, этот прибор может использоваться для непрерывного ее измерения. Сложным в использовании также является прибор для непрерывного измерения фильтрации с помощью красителя. Для оценки концентрации красителя в нем используется спектрофотометр или анализаторы другого типа.

Приведенные здесь сведения об автоматических измерителях величины фильтрации носят информационный характер. Возможно, что при дорогостоящих работах по доизучения шельфа, найдутся средства и для разработки отечественных приборов или закупки их за рубежом.

В очагах вертикальной фильтрации подземных вод, как правило, возникают придонные аномалии вызванные разгрузкой. Они проявляются в виде довольно тонкого слоя у самого дна и не могут быть опробованы обычными (стандартными) океанологическими приборами, в том числе батометрами различных конструкций. Между тем изучение структуры этих аномалий представляет несомненный интерес для выяснения механизма субмаринной разгрузки перетеканием и оценке величины разгрузки [13]. О величине аномальной зоны и ее структуре можно судить по результатам экспериментальных наблюдений с помощью оригинального градиентного батометра проведенных в Черном море (рис.7).

Из рис.7 видно, что толщина придонной аномалии при СРП составляет всего 33 см, а наиболее контрастно она проявляется у самого дна в 3 – 4 см слое. Устойчивое проявление таких аномалий возможно только в закрытых бухтах при отсутствии вдольбереговых течений. На открытых побережьях изучение очагов вертикальной фильтрации целесообразно проводить, используя геотермический метод [19].



ры в донные отложения на 1 – 1,5 м измеряется геотемпературный градиент более холодных, чем морские, разгружающихся подземных вод. Далее, с использованием уравнения теплопроводности вычисляется действительная скорость фильтрации и расход подземных вод в пределах очага. Единичные измерения подобного рода были выполнены Институтом геологических наук Украины на Южном берегу Крыма.

Р и с . 7 . Изучение придонной аномалии с помощью измерения величины pH (б. Сторожевая, Крым): I – фон (морская вода); II – область смешения; III – область наибольших градиентов; IV – поровые воды.

Выводы.

– СРП является достаточно сложным в изучении процессом, поскольку не проявляется визуально. Визуализация его с помощью красителей возможна лишь в достаточно редких случаях, когда перекрывающие водоносный горизонт донные отложения отсутствуют, или имеют небольшую мощность. При больших расстояниях области разгрузки от области питания, большой мощности современных донных отложений с низкой водопроницаемостью, а также в зонах дисперсии пресных подземных вод, визуализация процесса СРП невозможна.

– Расчетные методы оценки величины СРП отличаются схематичностью и низкой точностью. В первую очередь эти недостатки относятся к методам оценок, выполняемых с помощью естественных радиоактивных трассеров.

– Количественные методы прямой оценки СРП достаточно трудоемки и дорогостоящи, главным образом, из-за выполнения подводных наблюдений. В связи с этим возникают проблемы с изучением режима разгрузки и получения её многолетних характеристик.

– Главной современной проблемой является создание единой общепризнанной методики изучения СРП. Для её создания необходима разработка стандартных, рациональных в экономическом плане, метрологически сертифицированных методов количественной оценки величины СРП и их унификация для различных природных условий (геологических, геоморфологических, гидрогеологических и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джамалов Р.Г. Подземный сток Терско-Кумского артезианского бассейна. – М.: Наука, 1973. – 96 с.
2. Джамалов Р.Г., Зекцер И.С., Месхетели А.В. Подземный сток в моря и Мировой океан. – М.: Наука, 1977. – 94 с.
3. Зекцер И.С., Джамалов Р.Г., Месхетели А.В. Подземный водообмен суши и моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 207 с.
4. Submarine groundwater discharge. – UNESCO, Paris 07 SP, 2004. – 35 p.
5. Moore W.S., Arnold K. Measurement of ^{223}Ra and ^{226}Ra in coastal waters using a delayed coincidence counter // J. Geophys. Res. – 1996. – 101. – P.1321-1329.
6. Гудзенко В.В., Дубинчук В.Т. Изотопы радия и радон в природных водах. – М.: Наука, 1987. – 160 с.
7. Гудзенко В.В. Радон в газах грязевых вулканов // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2008. – № 2. – С.116-127.
8. Barnett W.C., Taniguchi M., Oberdorfer J. Measurement and significance of the direct discharge of groundwater into the coastal zone // J. Sea Res. – 2001. – 46/2. – P.109-116.
9. Dulaiova H., Peterson R., Barnett W.C. A multi-detector continuous monitor for assessment of ^{222}Rn in the coastal ocean // J. Radioanal. Nucl. – 2005. – 263 (2). – P.361-365.
10. Burnett W.C. et al Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods // Science of the total Environment. – 2006. – 367. – P.498-543.

11. Cable J., Bugna G., Barnett W., Canton P. Application of ^{222}Rn and CH_4 for assessment of groundwater discharge to the coastal ocean // *Limnol. oceanogr.*– 1996.– 41.– P.1347-1353.
12. Kim G., Hwang D.W. Tidal pumping of groundwater into the coastal ocean revealed from submarine ^{222}Rn and CH_4 monitoring // *Geophys. Res. Lett.*– 2002.– 29. doi: 10.1029/2002GL015093.
13. Юровский Ю.Г., Байсарович И.М. Гидрогеология прибрежной зоны.– Симферополь: ДиАйПи, 2005.– 180 с.
14. Методические рекомендации по гидрогеологическому изучению акватории морей и крупных озер.– М.: ВСЕГИНГЕО, 1987.– 66 с.
15. Lee D.K. A device for measuring seepage flux in lake and estuaries // *Limnol. oceanogr.*– 1977.– v.22.– P.140-147.
16. Taniguchi M., Fukuo Y. Continion measurement of groundwater seepage using an automatic seepage meter // *Ground Water.*– 1993.– 31.– P.675-679.
17. Tanigushi M., Iwakawa H. Submarine graundwater discharge rates by a contiious heat-tape automated seepage metr in Ocaka Bay, Japan // *J. groundwater hydrol.*– 2001.– 43.– P.271-277.
18. Poulsen R.J., Smith C.F., O Rourke D., Wong T. Development and evaluation of an ultrasonic ground water seepage meter // *Ground Water.*– 2001.– 39.– P.901-911.
19. Лялько В.И., Митник М.М., Вульфсон Л.П. Исследование субмаринных источников геотермическими методами // *Геологический журнал.*– 1980.– т.40, № 3.– С.48-53.

Материал поступил в редакцию 28.10.2010 г.