

Наблюдения субмаринной разгрузки подземных вод (Южный берег Крыма) / С.И. Кондратьев, А.В. Прусов, Ю.Г. Юровский // Морской гидрофизический журнал. — 2010. — № 1. — С. 32-45. — Библиогр.: 11 назв. — рос.

УДК 551.49: 551.351.2

## **Наблюдения субмаринной разгрузки подземных вод (Южный Крым)**

*\* С.И. Кондратьев, А.В. Прусов, \*\* Ю.Г. Юровский*

*\* Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь, Украина*

*\*\* Украинский государственный геологоразведочный институт, Крымское отделение, Симферополь, Украина*

В статье анализируются результаты натуральных гидрологических и гидрохимических наблюдений субмаринной разгрузки подземных вод у мыса Айя (Южный берег Крыма). Использовалась измерительная аппаратура, разработанная в Морском гидрофизическом институте НАН Украины. Выполнены измерения скоростей течений, температуры, солености, мутности, содержания кремнекислоты и фосфатов в одной из карстовых полостей, а также на полигоне около нее. Даны 3 оценки дебита субмаринной разгрузки.

Субмаринная разгрузка подземных вод в карстовых полостях - это весьма сложный гидрофизический процесс. Схематически его можно представить, как движение разноплотностных потоков: пресного (подземные воды), распресненного (смесь пресных и морских вод) и морской воды. На движение этих потоков накладывается целый ряд внешних факторов: волнение (ветровые волны, зыбь, барические, стоячие), сгонно-нагонные и приливные явления, вдольбереговые течения и т.д. Соответственно, в пределах карстовой полости, где происходит субмаринная разгрузка подземных вод, и на прилегающей к ней акватории меняется гидродинамическая и гидрохимическая обстановка: изменяется вертикальное и горизонтальное распределение скоростей потоков, толщина движущихся слоев, гидрологические и гидрохимические поля. Изучение этих процессов представляет большой научный и практический интерес. Отдельные аспекты и общие ситуации в очаге субмаринной разгрузки рассматриваются в настоящей статье.

В сентябре 2007 г. сотрудниками Морского гидрофизического института НАН Украины проводились комплексные измерения субмаринной разгрузки подземных вод в

районе мыса Айя (Крым). Измерялись скорости течений, температура, соленость, мутность, содержание кремнекислоты и фосфатов. Работы были сосредоточены в районе карстовой полости в 100 м от мыса Пелекетто, а также в самой полости. На Рис. 1 дана схема района работ с указанием местоположения выполненных гидрологических станций вне полости.

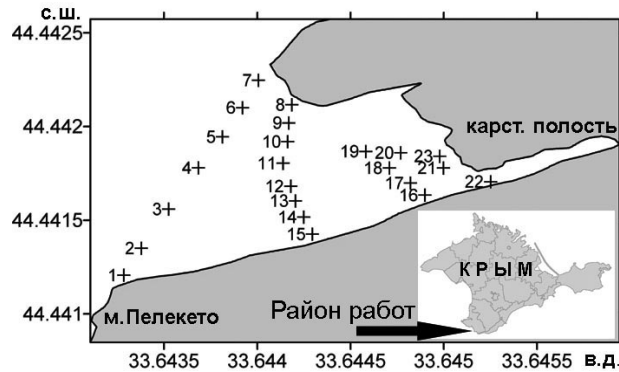


Рисунок 1. Схема гидрологического полигона в районе карстовой полости. Крестиками (1-23) отмечены гидрологические станции

Кроме того, были выполнены несколько буксировок (на глубине ~ 0,1-0,2 м) гидрологического и гидрооптического зондов вдоль береговой линии (5 м от берега), позволивших оперативно обнаружить следы субмаринной разгрузки [6]. Данные, полученные в результате полигонной съемки в районе полости и буксировки вдоль береговой линии, требуют специальной обработки, в том числе и численного моделирования и будут проанализированы позже. Проводились визуальные наблюдения за дрейфом поверхностных поплавков, выпущенных для оценки картины фоновых течений вблизи исследуемой карстовой полости.

Все измерения выполнялись новыми приборами, разработанными в Морском гидрофизическом институте НАН Украины. Компактность этих приборов позволяла проводить измерения, как на глубине, так и в тонком поверхностном слое, где, как правило, сосредоточена распресненная вода.

Измерения выполнялись в сезон устойчивой межени, которому предшествовала длительная засуха (дождей здесь практически не было более 4-х месяцев). На суше большинство источников в это время пересыхает, т.е. родниковый сток равен нулю.

Период выполнения измерений совпал с ситуацией сгона, вызванного действием продолжительного западного ветра. Анализ карт температуры поверхности моря, полученных со спутника NOAA-17, показал, что при общем фоне температуры поверхности моря в Черном море  $20-22^{\circ}\text{C}$ , а в районе работ до  $26^{\circ}\text{C}$ , 18-19 сентября от м. Херсонес до м. Аю-Даг наблюдалась ситуация развитого сгона [1]. На отдельных участках сгон отмечался на расстоянии 25 км от берега. Температура воды на акватории, охваченной сгоном, упала до  $13-15^{\circ}\text{C}$ . В день проведения работ - 20 сентября - акватория сгона резко уменьшилась, но вблизи мыса Айя температура воды осталась низкой и составила  $14^{\circ}\text{C}$ .

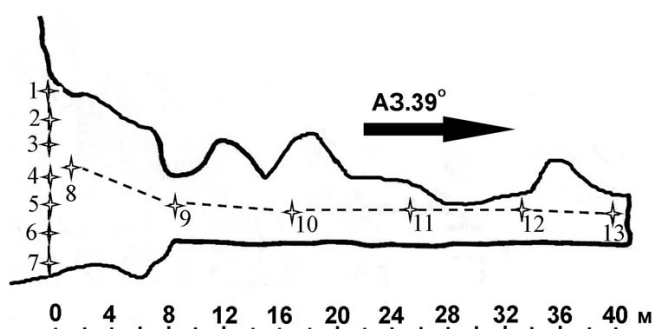


Рисунок 2. Водное зеркало карстовой полости и схема гидрологических станций на входе (станции 1-7) и внутри нее (станции 8-13). Стрелкой указано направление ( $39^{\circ}$  в.д.) в полость.

Работы велись в штиль. Наблюдалась зыбь с периодом около  $T = 3$  с, высотой  $h$ , не более  $0,30$  м, бегущая на юго-восток (т.е. почти под прямым углом к полости).

Измерения температуры и солености производились гидрологическим STD-зондом ГАП-12Р, а измерения показателя мутности погружным автономным мутномером ИМП-2а. Был выполнен гидрологический разрез по продольной оси полости длиной 41 м и поперечный разрез у входа в полость (схема на Рис. 2). На входе в полость на каждой вертикали были проведены измерения временной изменчивости температуры и солености с экспозицией  $0,5-1,0$  минуты.

На Рис. 3а,б хорошо различаются 3 слоя: *верхний* слой (до 1 м), подверженный влиянию ветровых волн, зыби, влиянию атмосферного аэрозоля на мутность. Там максимальны скорости течений из полости (что будет видно из дальнейшего анализа измеренных скоростей); *средний* слой 2-6 м – «застойный» - температура и соленость почти постоянны, мутность максимальна, что, вероятно, связано с ростом содержания планк-

тона, обусловленного предшествующим апвеллингом; *нижний слой* (глубже 6 м), где существует придонный приток морской воды в полость.

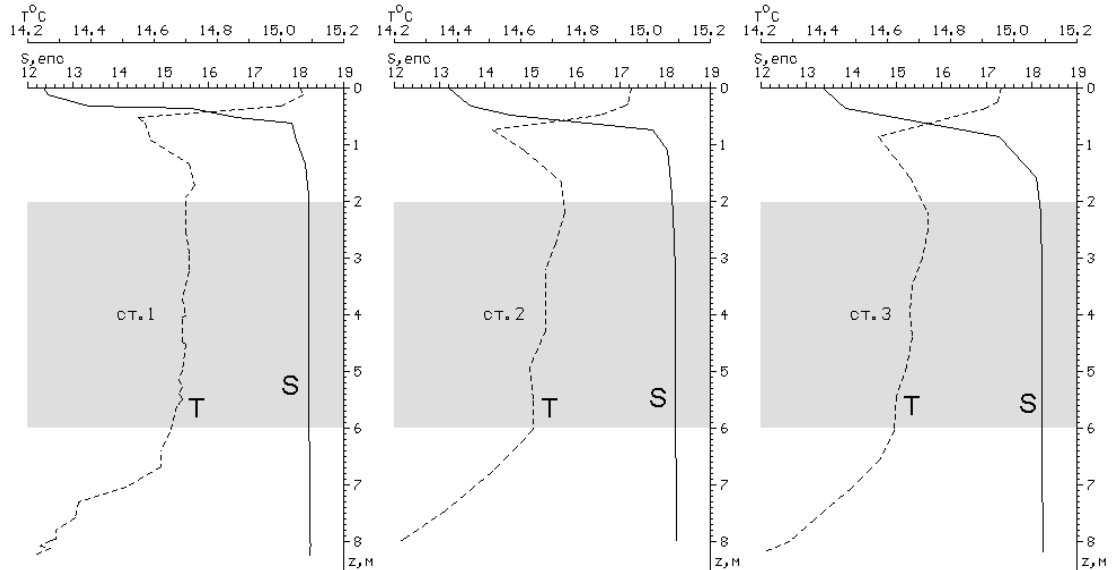


Рисунок 3 а. Вертикальное распределение температуры  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и солёности  $S$  (eps) на станциях 1-3. Расстояние между станциями около 1 м

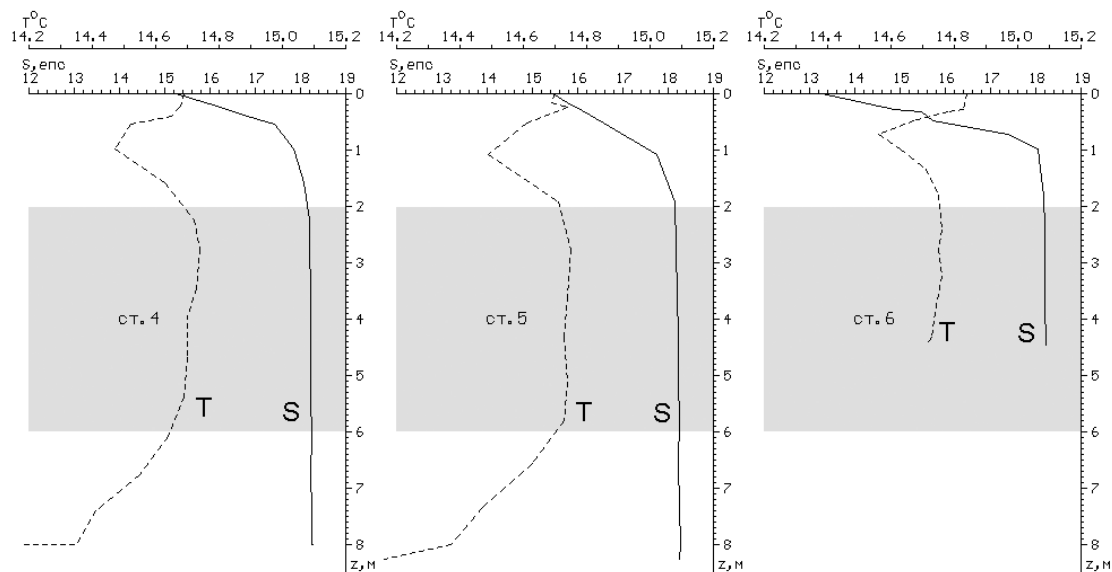


Рисунок 3 б. Вертикальное распределение  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и солёности  $S$  (eps) на станциях 4-6. Расстояние между станциями около 1 м

В целом вертикальная структура вод свидетельствует о том, что на разрезе ст.1-ст.7 вдоль входа в полость наблюдалась активная субмаринная разгрузка подземных вод. Ее следы прослеживаются до глубины 1,5 м. Максимальные изменения солёности заметны в слое 0-1 м. Граница нулевых вертикальных градиентов солёности залегает на глуби-

не 0,8-1,0 м. Максимальные вертикальные градиенты достигали 1 епс на 0,1 м. Наименьшая соленость и наибольшая температура, т.е. следы разгрузки пресных вод наблюдались у западной стенки входа в полость – ст.1 на Рис. 3а.

Рассмотрим, представленное на Рис. 4, распределение по вертикали термохалинных характеристик на осевом разрезе в полости (станции 8-13 на Рис. 2).

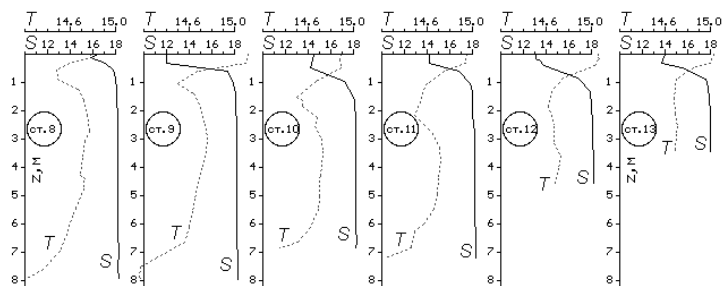


Рисунок 4 – Профили солености  $S$  (епс) и температуры  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) вдоль оси полости. Расстояние между станциями 8-13 ~ 7 м

По сравнению и их распределением на входе в полость, есть существенное отличие: непосредственно в полости наблюдался верхний *однородный* слой мощностью около 0,25 м, где отмечены повышенная температура и пониженная соленость. Т.е. следы субмаринной разгрузки здесь более заметны, чем на входе. В минимуме соленость достигла 12 епс. Диапазон ее изменчивости на поверхности от ст.8 до ст. 13 составил 4,5 епс (12,0-16,5). В 1993 году в ходе экспедиции ИГН и МГИ НАН Украины измерения в этой полости показали меньший разброс значений солености: 2 епс (10-12) [4]. Заметим, что разброс значений температуры в слое 1-3 м на разрезе станции 8-13 (внутри полости) больше, чем на входе в полость (станции 1-7). Наибольшее распреснение, которое можно определить, как по наименьшему значению солености (12 епс), так и по максимальной мощности распресненного слоя (0,3 м) наблюдается в узкости после входа в полость - станция 9 на Рис. 2. Второй максимум наблюдается на станции 12, вблизи кутовой части полости. Именно в этих местах находятся два источника субмаринной разгрузки, отмеченные ранее [4, 7-10]. Наличие мощного источника на дне вблизи ст.9 проявлялось на поверхности визуально.

Следы локализации источников пресных вод на осевом разрезе были отмечены и по данным измерений показателя мутности. Стоит обратить внимание на бóльший, по сравнению с разрезом на входе в полость, разброс значений температуры в слое 1-3 м.

Оценим дебит исследуемой разгрузки по формуле (1). Для этого имеем значения фоновой солености  $S_\phi$  (18,22 епс) и ее распределение  $S(x, z)$  по вертикальному сечению толщи вод на входе в карстовую полость.

$$Q = \int_0^H \int_0^L U_{cp}(x, z) \cdot \frac{S_\phi - S(x, z)}{S_\phi - S_n} dx dz, \quad (1)$$

где  $Q$  – искомый дебит;  $x, z$  – ширина, глубина на входе в полость;  $L, H$  – максимальные ширина и глубина (7 и 8 м);  $U_{cp}(x, z)$  – средняя скорость течения в точке  $(x, z)$  сечения;  $S_\phi$  – фоновая соленость;  $S(x, z)$  – соленость, измеренная в точке  $(x, z)$ ,  $S_n$  – соленость (минерализация) пресной воды (в нашем случае порядка 0,7 г/л) [5].

Остается оценить распределение средней скорости  $U_{cp}(x, z)$  в этом же сечении.

**Измерения скоростей.** Для выполнения задачи использовался новый прибор ИСТ-1. Его принципиально новые конструктивные особенности описаны в работе [3]. Он предназначен для измерений, индикации и регистрации в цифровом виде скорости течения, глубины и температуры воды в водотоках и водоемах. Измеритель можно закреплять на штанге, тросе или кабеле на глубинах до 25 м. Конкретная максимальная глубина определяется установленным датчиком давления. Измерение производится с накоплением данных в энергонезависимой памяти с отображением данных на дисплее бортового блока или ПЭВМ. Встроенные в микроконтроллерах программы обеспечивают управление измерениями и первичной обработкой данных.

Измерения проводились на входе в полость с маломерного судна. Был натянут трос с маркерами, для фиксации судна, а также для точной привязки на местности при проведении повторных измерений. Измерения удалось выполнить на трех станциях: посередине, а также на расстояниях 1,5 м от левой и правой стенок полости. Прибор крепился на двухметровой штанге. Пробные измерения на горизонте 0,1 м, непосредственно с судна, выявили его заметные вертикальные колебания, обусловленные зыбью (амплитуда колебаний до 0,1 м, см. Рис. 5). После установки прибора на специальный поплавок амплитуда вертикальных колебаний уменьшилась в 3 раза. На каждой станции выполнялось несколько измерений: на глубинах 0-0,5 м с шагом 0,1 м, далее до глубины 2 м с шагом 0,5 м. Экспозиция составила 2-3 минуты, данные регистрировались с односекундным осреднением.

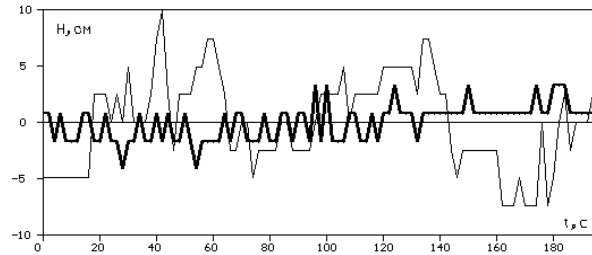


Рисунок 5. Вертикальные колебания (см) прибора ИСТ-1, установленного на горизонте 0,1 м. Тонкая линия – колебания без поплавка. Жирная линия – колебания с поплавком

На Рис. 6 приведены временные ряды скоростей (см/с), измеренных посередине входа в полость на горизонтах 0,1-0,2-0,3 м (левый фрагмент, сверху - вниз) и 1,0-1,5-2,0 м (правый фрагмент). Положительные значения скоростей соответствуют течению *из полости*, отрицательные – *в полость*. Максимальные зафиксированные значения флуктуаций скорости ( $\pm 0,3$  м/с) примерно соответствуют орбитальным скоростям наблюдавшейся зыби. Для периода  $T = 3$  с длина волны  $\lambda$  на глубокой воде составляет  $\sim 14$  м. Глубины  $\sim 8$  м соответствуют глубокой воде. При этом орбитальная скорость  $U(x, z, t)$  на поверхности будет примерно равна 0,3 м/с. Затухание скорости с глубиной ( $e^{-kz}$ ) при  $\lambda = 14$  м должно было привести к ее уменьшению на горизонте 2 м примерно в 2 раза. По-видимому, несколько завышенные значения этих скоростей (см. Рис. 6, правый фрагмент) на горизонтах 1, 1,5 и 2 м, в основном обусловлены продольными колебаниями прибора. Конечно, эти упрощенные рассуждения, без упоминания отраженных волн (а отражения были) могут дать лишь грубые, предварительные оценки. Детали предстоит еще выяснить. При этом следует уменьшить дискретность измерений, чтобы контролировать влияние ветровых волн и зыби. Кроме того, следует учесть (акселерометром) и погасить продольные и вертикальные колебания прибора.

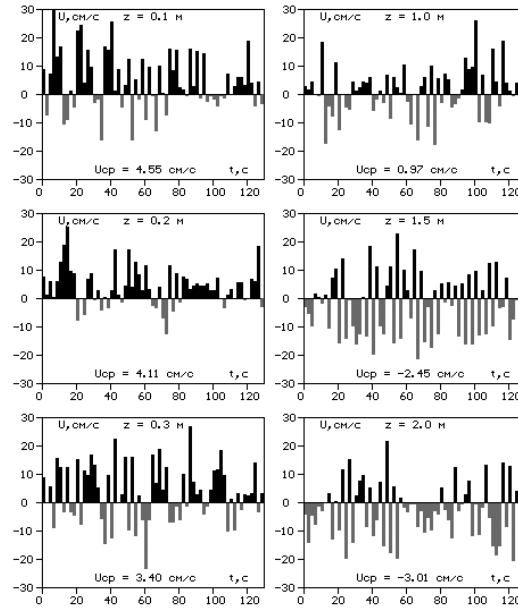


Рисунок 6. Временные ряды скоростей (см/с) на входе в полость (ст.4). Левый фрагмент – горизонты 0,1-0,2-0,3 м. Правый фрагмент – горизонты 1-1,5-2 м. Положительные значения скоростей – из полости, отрицательные – в полость.  $U_{cp}$  – средние скорости, полученные осреднением за время экспозиции

На Рис. 7 приведены значения  $U_{cp}$  – средних скоростей, полученные осреднением за время экспозиции. Для станции 4 (середина выхода из полости) они равны +4,6; +4,1 и +3,4 см/с на горизонтах 0,1-0,2-0,3 м, соответственно, и +1,0; -2,5 и -3,0 см/с на горизонтах 1,0-1,5-2,0 м. Таким образом, посередине входа в полость, в верхнем метровом слое, где в основном сосредоточена распресненная вода, поток направлен из полости. Он выносит эту пресную воду в открытое море со скоростью в несколько см/с.

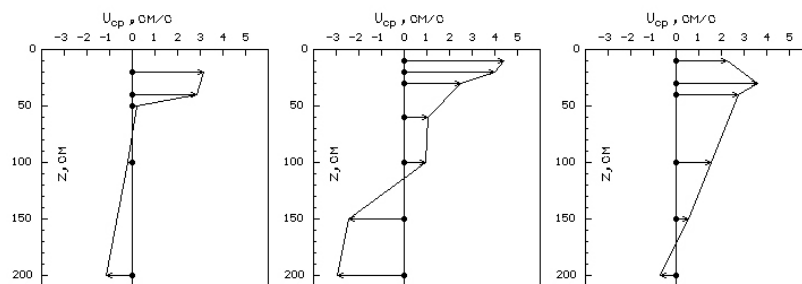


Рисунок 7. Распределение по глубине  $z$  средних скоростей на станциях 2, 4, 6 (левый, средний, правый фрагменты) до проведения линейной аппроксимации по глубине

Представляет несомненный интерес сравнение экспериментальных данных, приведенных на Рис. 7, с ранее проведенными исследованиями. В 1982-84 г.г. на том же ра-



бочем створе и трех рабочих вертикалях (станциях) Ю.Г. Юровским проводились измерения скоростей течения с помощью запусков красителей (флюоресцеина). Трассер запускался порциями на фоне масштабной сетки. Процесс фиксировался в подводном положении кинокамерой. Средние расчетные значения этих скоростей приведены в Табл. 1.

Таблица 1. Средние значения положительных скоростей на рабочем створе карстовой полости ( $U_1$  – средняя скорость слоя 0-0,20 м,  $U_2$  – средняя скорость слоя 0,20-0,40 м)

Дата	$U_1$ , см/с	$U_2$ , см/с	$Q$ , м <sup>3</sup> /сут
08.08.82	7,0	4,2	3778
14.10.83	4,0	2,4	2207
21.07.84	4,4	2,6	2382

Они были получены для слоев 0-0,20 м ( $U_1$ ), и 0,20-0,40 м ( $U_2$ ), как среднеарифметические скоростей, измеренных у левой стенки, в центре и у правой стенки карстовой полости.

Расходы пресной воды из полости составили: 08.08.82 – 3778 м<sup>3</sup>/сут, 14.10.83 – 2207 м<sup>3</sup>/сут, 21.07.84 – 2382 м<sup>3</sup>/сут.

Вертикальное распределение положительных скоростей, измеренных в 2007 г., имеет особенность: на станции в центре створа положительные скорости (из полости) прослеживались до глубины 1,10 м, а у правой стенки – до глубины 1,80 м (см. Рис. 7). Вероятно, такое распределение, обусловлено отраженными от стенок полости волнами зыби. В 1982-84 г.г. положительные скорости наблюдались лишь в самом верхнем слое – до глубины не более 0,40 м.

Для более аккуратной оценки по формуле (1) дебита субмариной разгрузки подземных вод из полости заполним пробелы в данных их линейной аппроксимацией по глубине. При этом будем заполнять пропуски только там, где значения средних скоростей положительны. На Рис. 8 показано распределение средней скоростей после ее линейной аппроксимации по глубине.

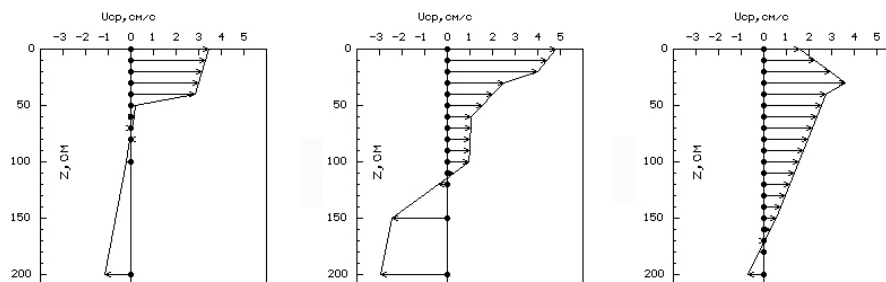


Рисунок 8. Распределение по глубине  $z$  средних скоростей на станциях 2, 4, 6 (левый, средний, правый фрагменты) после проведения линейной аппроксимации на тех глубинах, где  $U(z) > 0$

Теперь выполним аппроксимацию значений средней скорости в горизонтальных плоскостях, перпендикулярных вертикальному сечению на выходе из карстовой полости, чтобы заполнить пробелы в данных на станциях 3 и 5.

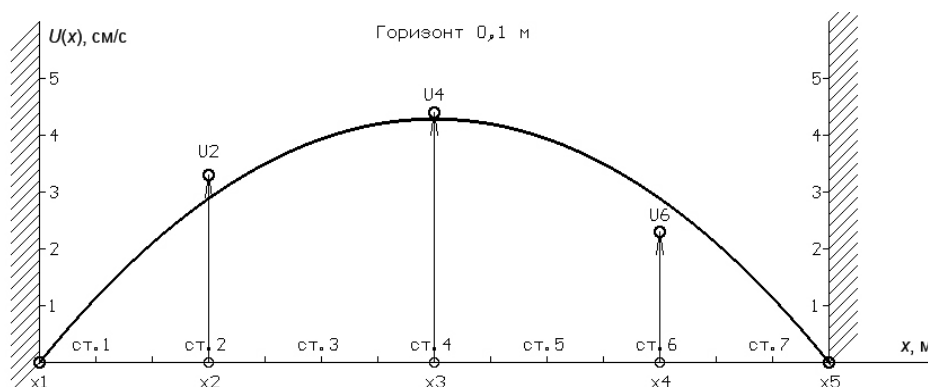


Рисунок 9. Пример параболической аппроксимации средней скорости на выходе из полости на горизонте  $z = 0,1$  м. Сумма квадратов отклонений параболы от значений скоростей, измеренных на станциях 2, 4, 6 - минимальна

На Рис. 9 показано расположения станций 1-7 поперек входа в полость. Расстояние между ними на оси  $x$  равно 1 м. После проведения линейной аппроксимации по глубине, имеем 5 значений скорости на каждом горизонте:  $U(x_1) = 0$ ,  $U(x_5) = 0$ , и три значения средней скорости  $U_2$ ,  $U_4$ ,  $U_6$ , измеренные на станциях 2, 4, 6. Предполагая параболическую зависимость средней скорости от горизонтальной координаты  $x$ , сводим задачу аппроксимации к проведению «наилучшей» параболы через 5 заданных точек. Причем,  $U(x_1) = 0$ ,  $U(x_5) = 0$  (прилипание), а сумма квадратов отклонений значений параболы в точках  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  от измеренных величин  $U_2$ ,  $U_4$ ,  $U_6$  должна быть *минимальной*.

Пусть распределение средней скорости по горизонтали на глубине  $z$  имеет вид

$$U(x) = ax^2 + bx + c, \quad (2)$$

причем

$$U(0) = 0, \quad U(x_5) = 0, \quad (3)$$

следовательно,  $c = 0$ ,  $b = -ax_5$ . Таким образом,

$$U(x) = a \cdot x^2 - ax_5 \cdot x. \quad (4)$$

Отклонения  $\delta_2, \delta_3, \delta_4$  параболы при  $x = x_2, x_3, x_4$  от измеренных скоростей  $U_2, U_4, U_6$  равны, соответственно:

$$\begin{aligned} \delta_2 &= U_2 - a \cdot (x_2^2 - x_5 x_2), \\ \delta_3 &= U_4 - a \cdot (x_3^2 - x_5 x_3), \\ \delta_4 &= U_6 - a \cdot (x_4^2 - x_5 x_4). \end{aligned} \quad (5)$$

Запишем необходимое условие минимума по  $a$  суммы квадратов этих отклонений

$$\frac{\partial(\delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2)}{\partial a} = 0. \quad (6)$$

Получим

$$a = \frac{x_2(x_2 - x_5)U_2 + x_3(x_3 - x_5)U_4 + x_4(x_4 - x_5)U_6}{x_2^2(x_2 - x_5)^2 + x_3^2(x_3 - x_5)^2 + x_4^2(x_4 - x_5)^2}, \quad (7)$$

$$b = -a \cdot x_5.$$

Теперь по формуле (1), имея данные о распределении средней скорости и солёности, оценим расход  $Q_s$  (суммарный дебит всех источников субмариной разгрузки внутри полости) через в поперечное сечение на выходе их карстовой полости:

$$Q_s = 1915 \text{ м}^3/\text{сут}. \quad (8)$$

Следует напомнить, что период май–август 2007 года был аномально засушливым и аномально жарким, а дожди, прошедшие за несколько дней до наших измерений, не могли существенно повлиять на результат. Т.к. известно, что скорость движения трещинно–карстовых вод, измеренная индикаторными методами в районе водосборов, питающих исследуемые нами субмаринные источники, составляет 0,46-1,82 км/сут, а рас-

стояние от Ай-Петринской яйлы до м. Айя через Байдарскую долину (возможный вариант пути питания субмаринных вод) превышает 30 км.

Безусловно, приведенная оценка величины дебита весьма приближительна, в том числе и из-за высокой временной изменчивости температуры и солености. Так, только на двух вертикалях диапазон изменений солености составил 0,3-0,5 епс. На остальных вертикалях он составил от 1 до 5 епс. Такую большую изменчивость можно объяснить большими вертикальными градиентами солености (напомним, что они доходили до 1 епс на 0,1 м). Такие градиенты могут быть обусловлены, как естественными флуктуациями, так и погрешностями измерений (вертикальными колебаниями измерителя солености).

**Распределение кремнекислоты и фосфатов на выходе из полости.** На Рис. 10 представлено распределение кремнекислоты на выходе из полости, полученное 18 сентября (зыбь высотой примерно 1 м) и 20 сентября (полный штиль, высота зыби – не более 30 см). В штилевых условиях 20 сентября, Рис. 10 б, наблюдался поверхностный слой вод толщиной примерно 0,5 м, где концентрация кремнекислоты (максимальное значение 45 мкМ) в 10-30 раз превышает фоновое значение 1,57 мкМ (нераспресненная морская вода).

Распределение кремнекислоты на выходном сечении из полости (18 сентября), Рис. 10а, также показало наличие поверхностного слоя с повышенным содержанием кремнекислоты толщиной около 1 метра, при этом фоновое содержание кремнекислоты было в 2-2,5 раза выше. Т.е. в данных погодных условия "размылся" верхний 0,5 метровый слой распресненных вод до толщины примерно 1 м, и произошло увеличение фоновой концентрации кремнекислоты в придонных нераспресненных водах. При этом характер вертикального распределения кремнекислоты качественно почти не изменилась.

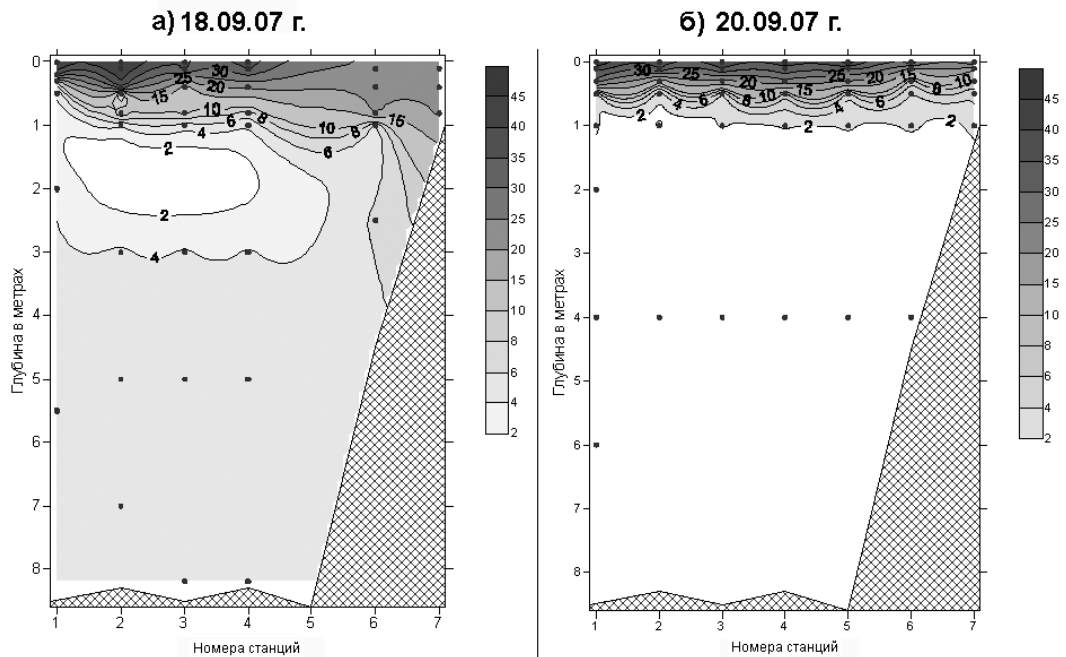


Рисунок 10. Пространственное распределение кремнекислоты в мкМ на выходе из полости. Концентрация кремнекислоты над источником 18.09.07 - 53 мкМ, 20.09.07 - 67 мкМ

Распределение фосфатов на выходе из полости в условиях зыби 18 сентября (Рис. 11а) не дало четкой стратифицированной картины. На сечении были отмечены несколько участков с повышенным содержанием фосфатов. В штилевую погоду 20 сентября (Рис. 11б) наблюдался поверхностный слой, толщиной около 0,5 метра, с повышенным содержанием фосфатов. Т.е. погодные условия 18 сентября изменили картину распределения качественно.

Следует отметить, что присутствие фосфатов в распресненных водах было не так контрастно, как для кремнекислоты, максимальная концентрация достигала 0,15 мкМ при фоновой около 0,01 мкМ, т.е. наблюдалось примерно 5-ти кратное превышение, при минимально определяемой концентрации 0,03 мкМ [2]. В то же время в наиболее распресненных водах, отобранных непосредственно над выходом субмаринных вод содержание кремнекислоты составило 67 мкМ, что в 40 раз больше фоновой концентрации.

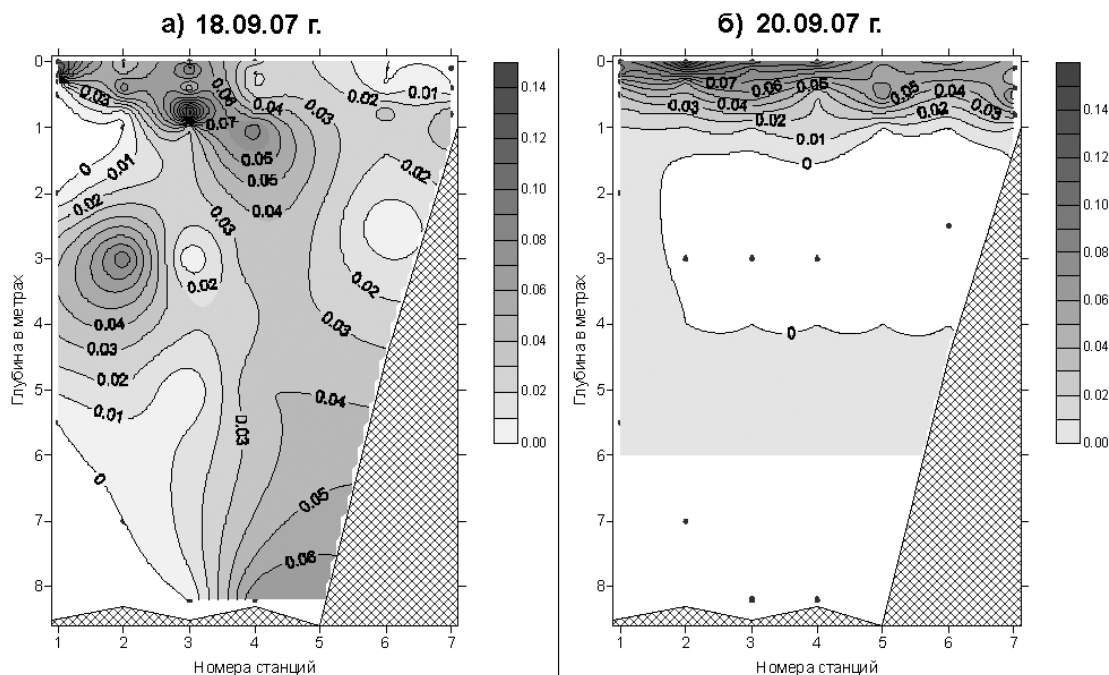


Рисунок 11. Пространственное распределение фосфатов в мкМ на выходе из полости.  
Концентрация фосфатов над источником 18.09.07 - 0,04 мкМ, 20.09.07 - 0,11 мкМ

Отбор проб на прилегающей к полости акватории был выполнен 21 сентября в условиях, когда высота зыби доходила до одного метра. Распределение кремнекислоты на поверхности возле карстовой полости (Рис. 12) показало наличие области повышенного содержания у южной стенки полости, в которой концентрация кремнекислоты достигала 18 мкМ при фоновой концентрации около 1,57 мкМ. Самое простое объяснение такого распределения кремнекислоты в поверхностных водах - наличием там источника пресной воды, расположенного на дне, не годится, т.к. никакого источника там нет. Такое распределение, вероятно, обусловлено трансформацией картины поверхностных течений из-за резкой смены направления ветра. Предварительные численные эксперименты с помощью трехмерной баротропной линейной модели ветровых течений говорят именно об этом. По полученным ранее данным, поверхностное течение распределенных вод в спокойную погоду направлено из полости вдоль восточного берега (стрелки на Рис. 12). Туда, вероятно, и должен смещаться максимум содержания кремнекислоты.

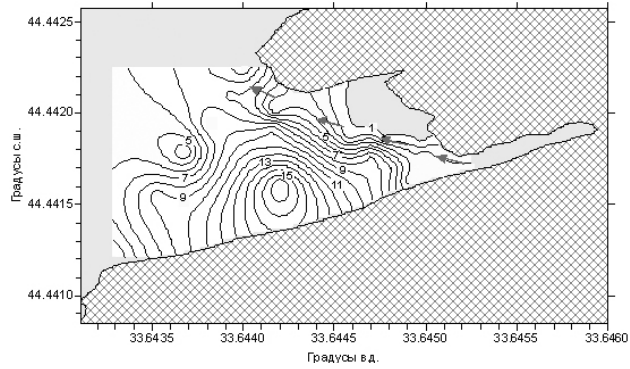


Рисунок 12. Распределение кремнекислоты (мкМ) на поверхности вблизи полости 21.09.2007 г. Расположение станций см. на Рис. 1. Стрелками показано направление течения из полости в спокойную погоду

**Оценка дебита по данным измерений кремнекислоты и фосфатов.** Распределение скорости  $U$ , фосфатов  $P$  и кремнекислоты  $Si$  от поверхности до глубины 1 м после проведения линейной аппроксимации по глубине показано на Рис 13 (скорости на глубинах, больших 1 м, направлены в полость и в формировании искомого дебита не участвуют).

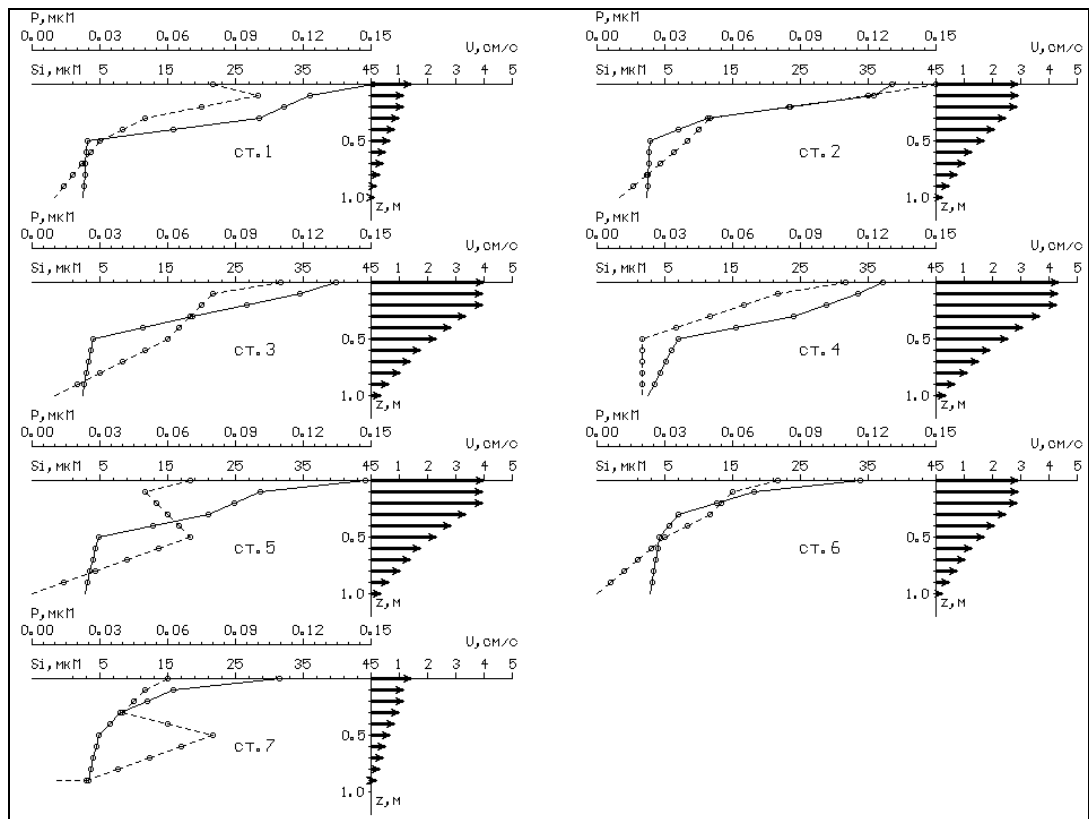


Рисунок 13. Распределение фосфатов  $P$ , кремнекислоты  $Si$  и средней скорости  $U$  на выходе из полости в верхнем метровом слое (станции 1-7)

Получим расчетную оценку дебита, аналогичную оценке (8) ( $Q_S = 1915 \text{ м}^3/\text{с}$ ), опираясь на измеренное содержание кремнекислоты  $Si$ . Содержание кремнекислоты в пресной подземной воде  $Si_n$  нам пока не известно.

Рассмотрим концентрации двух вещества  $S$  и  $P$  в морской воде. Пусть  $S_\phi$  и  $P_\phi$  - их фоновые значения. Пусть  $S_n$  и  $P_n$  - их концентрации в подземной воде. Причем величина  $P_n$  - не известна. Для любой пары из  $N$  значений  $(S_i, P_i)$  ( $i = 1, \dots, N$ ), измеренных в одной точке моря, должно выполняться

$$\frac{S_\phi - S_i}{S_\phi - S_n} = \frac{P_\phi - P_i}{P_\phi - P_n}, \quad (9)$$

следовательно,

$$P_n = \frac{(S_\phi - S_n) \cdot P_i + (S_n - S_i) \cdot P_\phi}{S_\phi - S_i}. \quad (10)$$

При  $S_i = S_\phi$  величина  $P_n$  в выражении (4)  $\rightarrow \infty$ . Поэтому при оценивании  $P_n$  по формуле (11) (как среднее из  $N$  измерений)

$$P_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(S_\phi - S_n) \cdot P_i + (S_n - S_i) \cdot P_\phi}{S_\phi - S_i}, \quad (11)$$

значения  $S$ , близкие к фоновой солености  $S_\phi$ , из оценок следует убрать.

В нашем случае, вместо  $N = 43$  остаются 30 точек измерений солености и кремнекислоты  $(S_i, P_i)$ , где  $S_i \neq S_\phi$ . Оценка величины содержания кремнекислоты в подземной воде по формуле (11) такова:

$$Si_n \sim 109,2. \quad (12)$$

Аналогичную оценку можно получить, построив прямую  $Si = A \cdot S + B$ , проходящую через рой точек  $(S_k, Si_k)$  ( $k = 1, \dots, N$ ), минимизируя сумму квадратов отклонений этих точек от искомой прямой.

Теперь, зная величину  $Si_n$ , и заменив в формуле (1)  $S$ ,  $S_\phi$ ,  $S_n$  на  $Si$ ,  $Si_\phi$ ,  $Si_n$ , оценим дебит  $Q_{Si}$  подземной воды из карстовой полости по содержанию кремнекислоты  $Si$ .

Получаем



$$Q_{Si} = 1844 \text{ м}^3/\text{сут} \quad (13)$$

Сравнивая оценки (8) и (13), видим, что они отличаются лишь на 4%.

Найдем коэффициенты  $a$  и  $b$  в выражении для линейной связи солёности  $S$  и кремнекислоты  $Si$

$$Si = a \cdot S + b, \quad (14)$$

где

$$a = \frac{Si_\phi - Si_n}{S_\phi - S_n}, \quad b = \frac{Si_n S_\phi - Si_\phi S_n}{S_\phi - S_n}. \quad (15)$$

В нашем случае  $S_\phi = 18,22$ ,  $S_n = 0,7$ ,  $Si_\phi = 1,57$ ,  $Si_n = 109,2$ .

Таким образом,

$$Si = -6,1 \cdot S + 113,5. \quad (16)$$

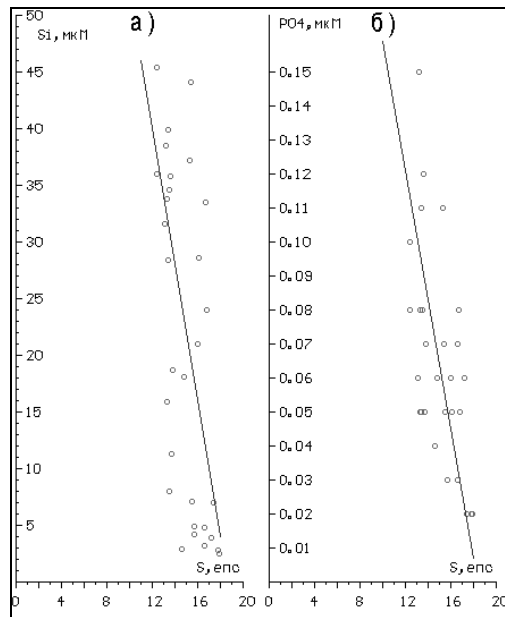


Рисунок 14. Оценка линейной связи содержания солёности  $S$  и

а) - кремнекислоты  $Si$ , б) - фосфатов  $P$

Еще раз оценим величину  $Si_n$ , выбрав в качестве «эталоны», найденную по распределению солёности оценку дебита  $Q_S = 1915 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Приравняем  $Q_{Si}$  и  $Q_S$ , получим

$$\int_0^H \int_0^L U_{cp}(x, z) \cdot \frac{Si_\phi - Si(x, z)}{Si_\phi - Si_n} dx dz Q_{Si} = \int_0^H \int_0^L U_{cp}(x, z) \cdot \frac{S_\phi - S(x, z)}{S_\phi - S_n} dx dz = 1915. \quad (17)$$

Варьируя под интегралом величину  $Si_n$ , добиваемся равенства левого интеграла в уравнении (17) значению 1915, что достигается при  $Si_n = 105$ . Используя соотношения (15), получаем

$$Si = -5,9 \cdot S + 109,1, \quad (18)$$

что весьма близко к оценке (16)

$$Si = -6,1 \cdot S + 113,5 \text{ (см. Рис. 14a)} \quad (19)$$

Полученные в 1993 и 1994 гг. оценки линейной связи  $S$  и  $Si$  таковы:

$$Si = -6,10 \cdot S + 109,6 \text{ (1993 г)}, \quad (20)$$

$$Si = -6,76 \cdot S + 124,3 \text{ (1994 г)}. \quad (21)$$

Они довольно близки к нашим оценкам.

Аналогичные оценки, полученные по данным о содержании фосфатов (Рис. 14б) дают:

$$P_n = 0,336 \quad (22)$$

$$P = -0,019 \cdot S + 0,349 \quad (23)$$

$$Q_P = 1739 \text{ - отличие от } Q_S \sim 10\% \quad (24)$$

**Выводы.** Анализ результатов измерений скоростей течений, температуры, солёности, содержания кремнекислоты и фосфатов показал, что субмаринная разгрузка подземных вод (в сентябре 2007 г. после аномально жаркого и засушливого лета) в самой крупной карстовой полости около м. Пелекетто составила:

По данным измерений *солёности*

$$Q_S = 1915 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

По данным измерений содержания *кремнекислоты*

$$Q_{Si} = 1844 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

По данным измерений содержания *фосфатов*

$$Q_P = 1739 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

В паводковый период эта величина может существенно вырасти и стать практически значимой.

За сутки из карстовой полости в море вытекало  $11215 \text{ м}^3$  распресненной воды. С этой водой было вынесено  $216018869,6 \text{ мкМ/сут}$  силикатов, и  $679038,3 \text{ мкМ/сут}$  фосфа-

тов. Т.е. в каждом литре распресненной морской воды из верхнего метрового слоя содержалось в среднем 19,26 мкМ кремниевой кислоты (при полном разбросе от 1,57 до 67 мкМ) и 0,06 мкМ фосфатов (при полном разбросе от 0,01 до 0,15 мкМ).

Испытание приборов и оборудования показало их пригодность для работы в этих специфических условиях. Об этом свидетельствуют, полученные разными физико-химическими методами аналогичные выводы о термохалинной структуре вод, распресненных источниками субмариной разгрузки. Для получения в дальнейшем более точных данных, приборы и оборудование нуждаются в некоторой конструктивной модернизации.

### Литература

1. Горячкин Ю.Н., Иванов В.А. Изменчивость солености поверхностных вод в прибрежной зоне Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005, вып. 12. – С. 21-27.
2. Еремеева Л.В., Романов А.С., Овсяный Е.И. и др. Гидрохимические исследования в 33-м рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Колесников». - Севастополь, 1995. – (Препринт / НАН Украины. МГИ). - 42 с.
3. Иванов В.А., Прусов А.В., Юровский Ю.Г. Субмаринная разгрузка подземных вод у м. Айя (Крым) // Геология и подземные ископаемые мирового океана.- 2008. – (в печати)
4. Кондратьев С.И., Долотов В.В., Моисеев Ю.Г., Щетинин Ю.Т. Субмаринные источники пресных вод в районе мыс Фиолент – мыс Сарыч // Морской гидрофизический журнал.- 1998.- №3. – С. 57-69.
5. Коротков А.И., Павлов А.Н. Гидрохимический метод в геологии и гидрогеологии. Л., Недра, 1972. – 184 с.
6. Шнюков Е.Ф., Клещенко С.А., Митин Л.И., Клещенко Л.Г., Марков А.А. Поиск субмаринных источников в каньонах материковой окраины Южного берега Крыма // Препринт 89-24.-1989.- Киев.- ИГН НАН Украины. – 39 с.
7. Юровский Ю.Г. Оценка величины субмариной разгрузки карстовых вод в районе мыса Айя // Морской гидрофизический журнал.- 1998.- №3. – С. 78-80 .

8. Юровский Ю.Г., Байсарович И.М., Щетинин Ю.Т., Кондратьев С.И. Мониторинг субмаринных источников в районе м. Айя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа,- Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000.- Вып. 7.- С. 46-52.
9. Юровский Ю.Г., Байсарович И.М. Субмаринная разгрузка подземных вод и водный баланс // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності.-2002.-№2.-С. 71-79.
10. Юровский Ю.Г., Байсарович И.М. Гидрология прибрежной зоны. – Симферополь: «ДиАйПи», 2005. – 148 с.