

УДК 504.43:504.422

Г. С. Михневич, Е. А. Якимова

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ
ОБНАРУЖЕНИЯ СУБМАРИННОЙ РАЗГРУЗКИ
В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ И ОПЫТ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ**

63

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия
Поступила в редакцию 12.08.2023 г.
Принята к публикации 15.09.2023 г.
doi: 10.5922/gikbfu-2023-3-5

Для цитирования: *Михневич Г. С., Якимова Е. А.* Перспективные методы обнаружения субмаринной разгрузки в Балтийском море и опыт их применения // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер. Естественные и медицинские науки. 2023. №3. С. 63–77. doi: 10.5922/gikbfu-2023-3-5.

Субмаринная разгрузка подземных вод (СРПВ) – это гидрологический процесс, который обычно происходит в прибрежных районах и определяется как подводный приток пресных и солоноватых подземных вод континента в море. Разгрузка вод, резко отличающихся по составу от морских, приводит к формированию в придонном горизонте гидрохимических аномалий, изменяет состав донных осадков. В различных региональных условиях сток может осуществляться в виде сфокусированного потока по трещинам в карстовых и жильных породах, в виде рассеянного потока в рыхлых отложениях или в процессе рециркуляции морской воды в донных отложениях. В силу этого важно учитывать местные геологические и гидрогеологические условия, так как они могут существенно влиять на характер и распространение подземных вод и, соответственно, на возможность субмаринной разгрузки и вероятность ее обнаружения. Несмотря на повсеместность процесса СРПВ в шельфовой зоне, ее практическое обнаружение в большинстве случаев представляет сложную задачу. Цель исследования – выявить подходы, наилучшим образом позволяющие зафиксировать явление субмаринной разгрузки подземных вод в юго-восточной части Балтийского моря. Обнаружение субмаринной разгрузки в Балтийском море имеет весомое значение как для понимания процессов, происходящих в акватории, так и для оценки экологической ситуации. В работе рассмотрены различные методы обнаружения СРПВ: расчетно-аналитический, геофизический, радиоизотопный, химический и биологический, характеризуется опыт их применения в акватории юго-восточной Балтики, позволивший выделить участки, на которых происходит субмаринная разгрузка подземных вод юрских и меловых горизонтов. Сделан вывод о том, что для эффективного обнаружения очагов субмаринной разгрузки необходимо использование комплексного подхода, включающего в себя различные методы исследования.

Ключевые слова: субмаринная разгрузка, подземные воды, Балтийское море, индикаторы, методы, аномалии



Введение

Методы обнаружения субмаринной разгрузки подземных вод (СРПВ) (газогеохимический, гидрохимический, радиоизотопный, геохимический и биологический) обычно направлены на выявление основных индикаторов (маркеров), которые характеризуют разгрузку и создают разнообразные аномалии морской среды. Анализ опубликованных работ показывает, что основными используемыми методами, направленными на обнаружение СРПВ в Балтийском море, можно считать расчетно-аналитические, геофизические, химические, радиологические, биологические.

64

Каждый из районов Балтики характеризуется спецификой геологических условий: в ЮВ-секторе Балтики разгрузка подземных вод будет осуществляться преимущественно в виде рассеянного потока из осадочных рыхлых и сцементированных образований или по тектоническим нарушениям; вероятен совместный выход подземных вод и метана в покмарках [16].

Исследования субмаринной разгрузки в Балтийское море начались около полувека назад [6; 10; 11]. На настоящий момент экспериментальным способом доказано ее существование в различных бассейнах Балтики (бухта Эккернфёрде, Пуцкая бухта, Гданьский и Финский заливы, Лахолм-Бей и др.). Для обнаружения СРПВ применялись разнообразные методы, но чаще всего — химические. Гидрохимические методы также были положены в основу морских гидрогеологических исследований советского сектора Балтики в 80-е гг. прошлого века [10; 11].

Расчетно-аналитические методы направлены на исследование количественных характеристик СРПВ с помощью гидрогеологических значений, полученных на суше, то есть в области питания и формирования подземных вод, разгружающихся в море. В группу расчетно-аналитических методов входят данные мониторинга объема атмосферных осадков, испарения, а также уровня расхода разгружающихся вод в самом море, в скважинах, находящихся в области формирования на суше, речных вод [5; 15].

Геофизические методы включают исследование аномалий в рельефе, определение мощности осадочного чехла, зон тектонических деформаций, исследование трещиноватости и состава горных пород, температурных условий и насыщенности взвешенными веществами выходящих подземных вод; они предполагают обнаружение СРПВ по непрерывному сейсмоакустическому профилированию, вычисление оценки разницы в радиоактивности подземных и морских вод (радоновая и радиометрическая съемки). **Радиоизотопный метод** по сути является геофизическим и основывается на регистрации радиоактивного излучения в растворенных веществах в подземных водах и донных отложениях [3].

Геофизические методы — одни из главных источников информации при выполнении гидрогеологической съемки шельфа, особенно в глубоководной части шельфа и на бровке континентального склона [9; 14].



Химические методы направлены на выявление нехарактерных для морской воды и донных отложений макро- и микрокомпонентов (газов, биогенных элементов, солей и пр.). Химические методы подразделяются на геохимические, гидрохимические, газогеохимические.

Геохимический метод основан на анализе донных отложений и поровых вод на различных глубинах. Анализируются концентрации кремния, кальция, магния, калия, натрия, железа, тяжелых металлов (в минеральной компоненте осадка), главных ионов, хлоридов, сульфатов, фосфатов, азота аммонийного, сероводорода, растворенного неорганического и органического углерода (в поровых водах осадков) [17; 18; 20; 23].

Газогеохимический метод используется для определения выходов подземных вод в морскую среду, сопровождающихся попутным выделением газов, например метана [16; 18].

Гидрохимическая идентификация разгрузки основана на анализе распределения и изменений концентраций различных элементов (в основном таких же, как и при геохимическом методе) по горизонтам водной толщи. Для анализа химического состава вод необходимо определить площадь исследования, предположительно охватывающую область СРПВ, на всем протяжении, заложить линии гидрохимических профилей и точки станций. Далее проводится обор проб на каждой станции на различных горизонтах по вертикали [3; 13; 14].

Для локализации гидрохимических аномалий, которые могут быть вызваны разгрузкой подземных вод, используются специальные коэффициенты, основанные на соотношении главных ионов: натрия, хлора, магния и др., а также их пропорции. Коэффициенты различаются для положительной и отрицательной аномалий солёности [11].

После долгого перерыва первые попытки выявления СРПВ с помощью гидрохимического метода были реализованы с 2011 по 2013 г. в рамках экспедиционных исследований мелководной акватории, прилегающей к Калининградскому полуострову. Оработана методика обнаружения признаков субмаринной разгрузки с использованием гидрохимических методов. Для этого применялось STD-зондирование, измеряющее на станциях электропроводность (солёность), температуру, кислород, рН; также проводилась эхолотная съёмка. На участке предполагаемой СРПВ устанавливались гидрохимические станции, производился отбор проб морской воды на разных горизонтах (0, 10 м, дно); выявлены аномалии ионного состава морских вод. По итогам исследований сделано заключение о том, что гидрохимический метод приемлем для выявления очагов разгрузки подземных вод в Юго-Восточной части Балтийского моря [13].

Биологические методы. Изменения химического состава донных отложений и придонных вод, происходящие в результате СРПВ, отражаются на условиях обитания морских организмов. Это проявляется в изменении параметров донных экологических сообществ. Наиболее очевидным приемом фиксации изменений является определение общей численности и плотности различных видов организмов как в придонном слое, так и в верхних горизонтах донных осадков. Изменения в структуре экологических сообществ отмечались в случае разгрузки подземных вод и на мелководье, и в глубокой части Гданьского залива

[18]. Состав сообществ прокариотических организмов донных отложений определяется долей преобладающих классов, которые зависят от условий окружающей среды, таких как содержание кислорода, железа, метана и наличие сульфатредукции, а их изменение контролируется субмаринной разгрузкой [18].

Материалы и методы

В 2019–2023 гг. был выполнен комплекс работ, направленных на обнаружение признаков субмаринной разгрузки подземных вод и оценку ее влияния на донные отложения Гданьской впадины. Предварительно был проведен анализ факторов, способствующих субмаринной разгрузке (разломная тектоника, сейсмическая активность, проницаемость горных пород, палеоврезы, покмарки), была составлена гидрогеологическая схема российского сектора Юго-Восточной Балтики [9], что позволило выделить три участка дна для дальнейших исследований: первый расположен в северо-восточной части Гданьского бассейна, характеризуется наличием нескольких перспективных для субмаринной разгрузки факторов, прежде всего покмарка и разлома, второй лежит на продолжении Бакалинской разрывной зоны, третий — на продолжении Прегольской зоны разломов (рис. 1).

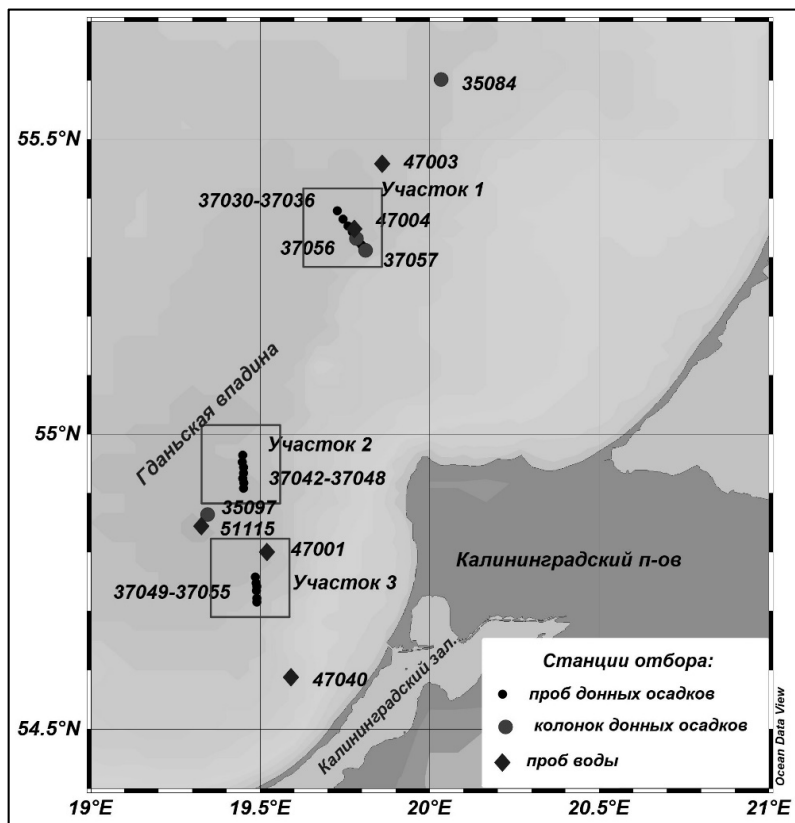


Рис. 1. Карта расположения отбора проб донных отложений и придонных вод



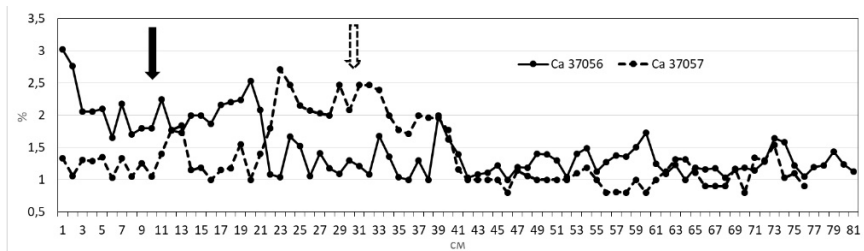
Произведены отбор проб и исследование химического состава придонных вод и донных отложений, углеводородных газов, содержащихся в осадках и придонных водах на нескольких ключевых полигонах, осуществлены геоакустические исследования донной поверхности и верхнего слоя осадков (табл., рис. 1).

Фактический материал, использованный в работе

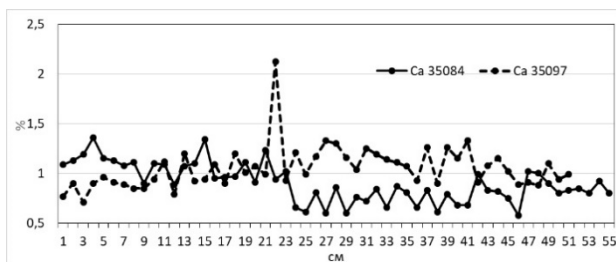
Компонент морской среды	Количество и характер проб	Анализируемые компоненты
Донные отложения	4 колонки донных отложений длиной от 56 до 81 см (дискретность отбора проб – 1 см)	Fe, Mn, K, Na, Ca, Mg, Ti, Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Cd, Pb, As
	21 проба из поверхностного слоя донных отложений (0–5 см)	
Поровые и придонные воды	4 гидрохимические станции: отбор проб на горизонтах 2 м от дна, дно и вода из трубки Ниемисте (поровые воды донных отложений)	Кислород, сероводород, диоксид углерода, общ. щелочность, кальций, железо, хлорид-ион.
	1 гидрохимическая станция: отбор проб на стандартных гидрологических горизонтах: верхний квазиоднородный слой, холодный подповерхностный слой, дно +5 м, дно +2 м, дно, вода из трубки Ниемисте (поровые воды донных отложений)	
Углеводородные газы придонных и поровых вод	5 станций, общее количество проб – 70	Метан, пропан, изомеры бутана, изомеры пентана

Результаты

Исследования состава донных отложений, проведенные в 2019–2020 гг. на первом выделенном перспективном участке в северо-восточной части Гданьского бассейна (колонки 37056, 37057, рис. 1), позволили установить аномалии в распределении химических элементов в вертикальном разрезе в сравнении с фоновыми колонками (колонки 35084, 35097) [20]. Было установлено, что в колонках, расположенных в зоне разлома, в среднем содержание основных макроэлементов (K, Na, Ca, Mg) было выше, чем на фоновых участках (рис. 2). Так, для колонок 37056 и 37057 (зона газонасыщенных отложений, покмарка и разлома) содержание K было на 20 % выше, чем в колонках 35084 и 35097 (фоновые участки), Na – на 23 %, Ca и Mg – на 46 %. Тяжелые металлы (Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Cd, Pb), наоборот, в зоне разломов показали отрицательную динамику, что, возможно, связано с их изъятием из осадка под воздействием биологических процессов либо с вымыванием недонасыщенными этими элементами подземными водами [20].



а



б

Рис. 2. Изменение концентрации кальция в донных отложениях:
а — колонки 37 056 и 37 057, расположенные в зоне разлома и покмарка;
б — фоновые колонки 35 084 и 35 097

Примечание. В колонке 37 056 в интервале 0–3 см концентрация Ca — более 2 %, до 20 см — около 2 % и ниже по колонке резко сокращается до 1–1,5 %. В колонке 37 057 наблюдается противоположное распределение Ca по вертикали: от 0 до 22 см — 1–1,5 %, ниже 22 см до 44 см — рост до 2–2,5 %. В фоновых колонках содержание Ca составляет менее 1 %.

При этом содержание Fe во всех колонках было сходным и в среднем отличалось на 2 %, что лежит в пределах погрешности метода определения. Это обстоятельство позволило использовать Fe в качестве нормирующего элемента [23]. Нормализация химических элементов к природному маркеру (агенту), накапливающемуся относительно однородно, позволяет сравнивать образцы с различным гранулометрическим составом и выявлять в осадочной толще маркеры поступления СРПВ.

Повышения нормализованных значений K, Na, Ca, Mg к Fe для зоны разлома и фоновых точек в общем повторяли натуральные соотношения (K — 23 %, Na — 27 %, Ca — 51 %, Mg — 42 %). В вертикальном распределении нормализованных значений особого внимания заслуживают повышенные значения K и Mg в колонке 37 056 на глубине 25–40 см, а также Mg и Ca в колонке 37 057, что может свидетельствовать об эндогенном привнесении.

Для исследования подобия между концентрациями всех 15 изученных химических элементов в слоях образцов отложений был использован иерархический кластерный анализ. По результатам кластерного анализа в колонках, расположенных в зоне покмарков и разломов, а также за их пределами, были выделены существенные различия в группировке слоев. В районе покмарка (колонка 37 056, слой 22–84 см) обнаружено несогласованное (чередующееся) группирование слоев по распределению элементов с укорачиванием кластерных связей между



элементами-маркерами (Ca, Mg, K, Na), что является одним из признаков поступления подземных вод в осадочную толщу. В остальных колонках данная группа не прослеживается и связи более размыты.

Также было проведено сравнение геохимических условий, что позволило выявить особенности в содержании некоторых элементов в поверхностном слое донных отложений на участках 1–3. Станции отбора проб были сосредоточены на трех разрезах, расположенных на участках с различными геолого-геоморфологическими условиями (рис. 1).

На участке 1 с покмарком и разломом зафиксированы максимальные средние значения Na и Ca (на 10–15% больше, чем на других участках). Ожидаемо высокими оказались значения стандартного отклонения, что объясняется очень сложными геологическими условиями участка. Эти данные хорошо согласуются с полученными на первом этапе результатами, согласно которым содержание макроэлементов (K, Na, Ca, Mg) в колонках 37056 и 37057, расположенных в зоне разлома и покмарка, было выше, чем в фоновых колонках [19; 20].

Зона разлома на участке 1 характеризуется уменьшением концентрации Fe до 3,7% (рис. 3). Зона станции 37056 (разлом) характеризуется локальным увеличением концентрации Na до 2,5% и значительным резким скачком Ca – до 2,4%, при этом концентрации Na и Ca имеют хорошую взаимную корреляцию (0,7), что может свидетельствовать об общем источнике этих элементов. Концентрация Mg в зоне разлома уменьшается до 1%, K – до 1,7% (рис. 3). Mg имеет обратную связь с Ca (–0,7). Зона разлома характеризуется аномальным взаимным соотношением маркерных элементов: концентрации Ca многократно превышают Mg, концентрация Na больше K (за счет резкого уменьшения последнего) (рис. 3). Обычные распределения имеют противоположный характер [7].

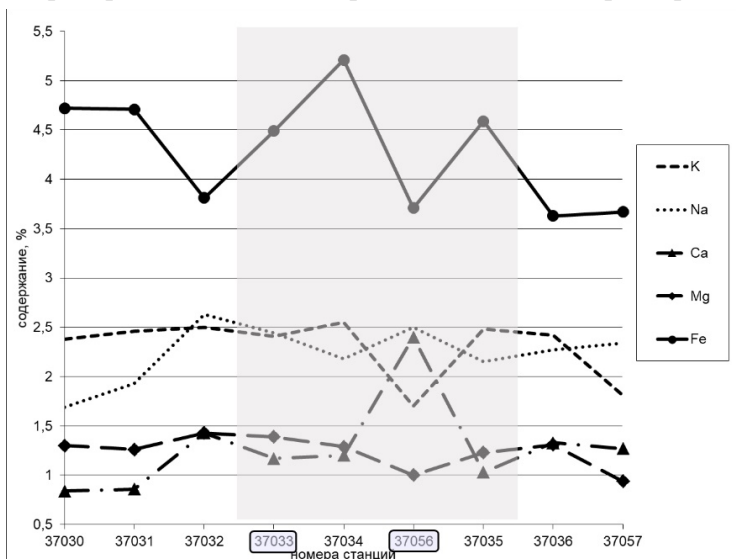


Рис. 3. Распределение концентраций Fe, K, Na, Mg, Ca в донных отложениях по разрезу на участке 1, %

Примечание. Станции 37033–37035, 37056 расположены в области газонасыщенных отложений (станция 37033 расположена близ покмарка, станция 37056 – близ разлома).



Участок 2 характеризуется прежде всего максимальными средними значениями Fe, Mg и K, а также микроэлементов. Несмотря на наличие разлома, аномальных скачков концентраций элементов и их соотношений не наблюдалось. Это может говорить о том, что разломная зона не служит «каналом» разгрузки подземных вод (и/или других флюидов) [7].

На участке 3 большинство элементов принимали в целом минимальные средние значения в сравнении с другими участками. Близ разлома концентрации Na имеют локальные увеличения (до 2,2–2,3 %); Ca имеет подобное Na распределение значений с максимумами близ разломов; коэффициент корреляции между Na и Ca составляет 0,6. Mg демонстрирует уменьшение содержания до 1 % в районе разлома (станция 37054). На станции 37054 в зоне разлома фиксируется явное преобладание Ca над Mg; на станции 37052 отмечается превышение концентрации Na над K, отмечавшееся ранее только на профиле участка 1 в зоне разлома [7].

Проведенные в 2021 г. исследования состава морской воды и поровых вод имели целью верифицировать и дополнить данные, полученные геохимическим методом [8]. Наиболее информативные данные были получены для первого участка.

Наряду с ожидаемыми характеристиками распределения кислорода (уменьшение концентрации ко дну, минимальные значения в поровых водах, зависимость абсолютных значений от глубины отбора проб), сероводорода (присутствие кислорода в придонном горизонте препятствуют появлению сероводорода, отмечающегося только на станции 47004 в условиях покмарка) и диоксида углерода (увеличением значений в придонном горизонте и поровых водах), а также резкого увеличения щелочности в придонном горизонте на станциях, расположенных в покмарковых структурах, наблюдалось аномальное распределение концентрации ионов кальция [8].

Нормальная концентрация **кальция** в придонных водах Гданьской впадины изменяется в пределах 80–130 мг/дм³ [12], в поровых водах — 120–140 мг/дм³ [17]. На станции 43003 Ca²⁺ имеет нормальные значения (около 100 мг/дм³). Наибольшие концентрации Ca²⁺ в придонном горизонте наблюдались на станциях 47001 и 47004 (около 150 мг/дм³). На станции 47001 концентрация кальция на горизонте 2 м от дна и у дна составила 145,2 и 145,4 мг/дм³ соответственно. На станции 47004 (участок 1) наблюдается резкий рост концентраций кальция в придонном горизонте на 50 % (до 155 мг/дм³ с величины 99,3 мг/дм³) [8].

Содержание **хлор-иона** имеет нормальные для морских вод значения и демонстрирует зависимость от глубины бассейна. Концентрации Cl⁻ на горизонте 2 м от дна и у дна меняются незначительно. В пробах на станции 47001 наблюдается слабый рост концентраций с 4707,8 до 4803,5 мг/дм³; на станции 47003 — с 4236,3 до 4378,1 мг/дм³, на станции 47040 — с 2977,8 до 3101,9 мг/дм³. На станции 47004 наблюдаются практически равные значения у дна и на горизонте 2 м (4679,4 и 4697,1 мг/дм³ соответственно) [8]. Согласно [12] содержание Cl⁻ в придонных водах



Гданьской впадины составляет от 4000 до 5100 мг/дм³. Увеличение содержания Cl⁻ до значений 4300–4500 мг/дм³ и более может рассматриваться как локальные зоны обогащения придонного слоя минерализованными растворами подземных вод. Эти зоны приурочены к различным тектоническим (в том числе и нефтеперспективным) структурам [12].

Газогеохимические исследования. В 2022 г. было проведено исследование качественного и количественного состава углеводородных газов на первом участке в районе предполагаемой субмаринной разгрузки подземных вод (в Гданьской впадине Балтийского моря). Колонки АИ60146-048 были отобраны непосредственно в покмарке, АИ61044-045 – в газонасыщенных илах.

Вертикальное распределение метана во всех изученных колонках достаточно однородно за исключением колонки АИ610046, отобранной в южной части участка (рис. 4). Концентрации метана изменяются от 0,270 до 463 мкмоль/дм³. В колонках АИ61044, 045, 047, 048 можно выделить верхний слой 0–20 см, в котором концентрации метана во всех колонках минимальны. Далее на горизонте от 20 до 60–70 см происходит рост концентраций, достигая максимума 303–463 мкмоль/дм³ на горизонте 60–70 см. Нижний опробованный горизонт характеризуется снижением концентраций.

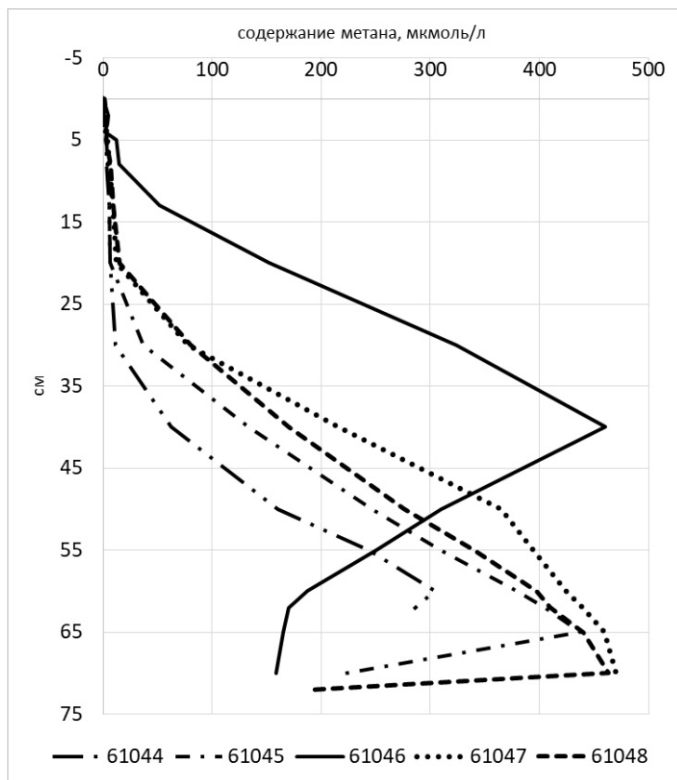


Рис. 4. Вертикальное распределение концентраций метана в колонках донных осадков станций 61 044–61 048



Колонка АИ61046 имеет следующие особенности: увеличение концентрации метана начинается ближе к поверхности — с горизонта 5 см — и пик концентрации (460 мкмоль/дм^3) приходится на горизонт 30–40 см, глубже происходит резкое уменьшение до 200 мкмоль/дм^3 и далее уменьшение становится более плавным (рис. 4). Следует отметить, что колонка АИ61046 располагается в той же части покмарка, где ранее были выявлены аномалии состава придонных вод и донных отложений.

Концентрация метана в **придонной воде** изменялась от 0,23 до $1,91 \text{ мкмоль/дм}^3$, максимальная концентрация измерена на станции АИ61046, которая располагается в южной части покмарка.

Таким образом, на станции 61 046, расположенной на участке, выделенном в качестве перспективного для обнаружения признаков субмаринной разгрузки, было установлено максимальное содержание метана в придонной воде, аномальное его вертикальное распределение в толще донных отложений. Достоверно установить генезис метана не удалось, однако, учитывая аномалии в составе придонных вод и донных отложений, можно предположить его эндогенное или комплексное (бактериальное + эндогенное) происхождение.

Обсуждение результатов

Выполненные работы позволили выделить аномалии состава донных отложений, придонных вод и растворенных газов на двух перспективных участках — первом (в северо-восточной части Гданьского бассейна) и третьем (на продолжении Прегольской зоны разломов).

Участок 1. По результатам многолучевой батиметрической съемки на участке 1 обнаружены покмарки вытянутой вдоль склона формы длиной 2,3–3,7 км и относительной глубиной до 3 м [22]. Покмарки и акустическая аномалия расположены над системой разломов. Разрывные нарушения, простирающиеся в зоне акустических аномалий северо-восточной части Гданьской впадины, сочленяются со структурным уступом верхнего мела [2]. Корни аномалий уходят в триасово-юрские отложения, в которых регистрируются подводящие каналы, часто заканчивающиеся в голоценовых отложениях «газовыми подушками». На участке 1 были обнаружены признаки поступления по таким трещиноватым каналам совместно с газом подземных вод [8; 9; 20]. В районе участка 1 можно ожидать разгрузку оксфорд-титонского водоносного горизонта [1].

Вертикальное распределение химических элементов и уровень взаимосвязей элементов позволяет утверждать, что в районе станции 37056 существуют дополнительные факторы, влияющие на седиментогенез. Вероятно, трещиноватая структура осадочной толщи и наличие тектонических нарушений способствуют поднятию к поверхности совместно с газовыми флюидами вод оксфорд-титонского горизонта.

Характер вертикального распределения химических параметров (кальция и хлора) на станции 47004 имеет ряд особенностей, позволя-



ющих говорить о возможном влиянии не только газовых (метановых) эманаций, но и субмаринной разгрузки подземных вод, как это было обнаружено в других частях Гданьской впадины [16]. Вертикальная седиментация не может объяснить аномально высокое содержание кальция в придонных водах, потому что точки пробоотбора расположены в сходных природных условиях под галоклином; поступление дополнительного Ca^{2+} с осадочным веществом и детритом и растворение его в районе покмарка выглядят маловероятными. Резкие изменения концентрации хлора в сторону ее увеличения или уменьшения также могут рассматриваться как следствие поступления подземных вод [12; 14; 16; 18].

Уменьшение в придонных водах концентрации кислорода до критических значений, появление сероводорода, увеличение концентрации кальция, значения общей щелочности, высокие концентрации хлора — все это может свидетельствовать о разгрузке верхнеюрского (оксфорд-титонского) водоносного горизонта, характеризующегося хлоридным анионным и натриевым, кальциево-натриевым катионным составом и минерализацией 12–17 г/дм³. Сходная общая минерализация придонных, подземных вод и подповерхностной зоны смешения не позволяет определить конкретные воды в придонном слое по результатам STD-зондирования.

Участок 3 имеет много общего и в геологических условиях (разлом, газонасыщенные отложения), и в поведении элементов в районе разлома (доминирование кальция над магнием, натрия — над калием), однако располагается в поле развития апт-сеноманского водоносного горизонта, как и участок 2. Трассой, по которой происходит подъем и разгрузка подземных вод, вероятно, является разлом. Воды апт-сеноманского горизонта характеризуется невысокой минерализацией (2–4 г/дм³), по составу — гидрокарбонатно-хлоридные, натриевые. Подобного типа воды разгружаются в южной части Гданьской впадины в пределах польской ИЭЗ на глубине около 88 м [18]. Субмаринная разгрузка там сопряжена с покмарком и оба флюида (подземные воды и газ) используют один канал подъема, происхождение которого связывается с разрывными дислокациями [18].

Заключение

Вследствие распространения четвертичных отложений на дне Балтийского моря на дне невозможно использовать датчики-расходомеры для обнаружения очагов и измерения их интенсивности, как это происходило в Черном море (близ полуострова Крым), Адриатическом море или близ Багамских островов. Методы непосредственного прямого обследования СРПВ также не эффективны из-за наличия сосредоточенной разгрузки подземных вод только по линиям тектонических разломов или в желобообразных углублениях дна. Использование данных дистанционного зондирования также спорно из-за высокой мутности



прибрежных вод и рассеянного характера субмаринной разгрузки. STD-зондирование также не эффективно в юго-восточной Балтике — илистая суспензия в придонном слое вод не позволяет с достоверностью произвести измерение зондом непосредственно у твердой границы, где датчики зондов заиливаются и показывают заведомо ошибочные значения.

Наиболее перспективными для выявления очагов субмаринной разгрузки в юго-восточной части Балтийского моря будут методы исследования состава и свойств донных отложений и придонного слоя вод. Геохимические исследования должны дополняться гидрохимическими данными о составе придонных вод. Отклонение содержания макрокомпонентов в придонных и поровых водах, изменения их соотношения могут рассматриваться как признак разгрузки. В случае совпадения аномалий состава отложений и придонных вод можно уверенно фиксировать очаг разгрузки. Данный подход позволил подтвердить неслучайный характер обнаруженных аномалий состава донных отложений. Газохимические исследования, направленные на выявление качественного и количественного состава углеводородных газов, позволяют определить их вероятную катагенетическую природу, что может быть дополнительным признаком субмаринной разгрузки.

Комплексирующие различные методы позволяет получить более точные данные. Подход к комплексированию методов и интерпретации должен быть тщательным и учитывать мировой и отечественный опыт проведения морских гидрогеологических исследований. В этом плане химические методы должны дополняться, а в какой-то степени и базироваться на результатах детальной съемки рельефа дна и акустической структуры осадочного слоя. Применение указанных приемов на практике позволило обнаружить участки субмаринной разгрузки предположительно оксфорд-титонских и апт-сеноманских водоносных горизонтов в юго-восточной части Балтийского моря.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области в рамках проекта №19-45-390007 р_а «Влияние субмаринной разгрузки подземных вод на формирование донных осадков в Гданьской впадине Балтийского моря».

Список литературы

1. Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря / гл. ред. О.В. Петров. СПб. : ВСЕГЕИ, 2010.
2. Блажчишин А.И. Палеогеография и эволюция позднечетвертичного осадконакопления в Балтийском море. Калининград : Янтарный сказ, 1998.
3. Вивенцова Е.А. Методика оценки подземного стока в Финский залив // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2003. №4. С. 107 — 111.
4. Воронов А.Н., Вивенцова Е.А. Характеристика подземного стока в Финский залив // Водные ресурсы. 2004. Т. 31, №6. С. 651 — 660.
5. Зекцер И.С. Подземные воды как компонент окружающей среды. М. : Научный мир, 2001.



6. Зекцер И. С., Куделин Б. И. К вопросу о подземном стоке в Балтийское море // Труды ГТИ. 1965. Вып. 122. С. 82–86.

7. Михневич Г. С., Кречик В. А., Крек А. В. и др. Региональные особенности химического состава поверхностного слоя донных отложений Гданьской впадины Балтийского моря // Сборник трудов VI Международной конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» имени Л. Н. Карлина. СПб.: Перо, 2022. С. 152–156.

8. Михневич Г. С., Крек А. В., Данченков А. Р. Особенности химического состава придонных вод как индикатор субмаринной разгрузки подземных вод // Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022 : тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. Тверь : ПолиПРЕСС, 2022. Т. 2. С. 87–91.

9. Михневич Г. С. Геологические предпосылки возникновения субмаринной разгрузки подземных вод в Юго-Восточной Балтике // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2021. №1. С. 42–53.

10. Мокрик Р. В. Гидрогеология побережья Советской Прибалтики (районирование, формирование подземных вод, подземный водообмен суши и моря) : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. М. : ВСЕГИНГЕО, 1990.

11. Мокрик Р. В., Грегораускас М. М., Вазнонис А. А. Способ выявления очагов субмаринной разгрузки подземных вод. Описание изобретения №1474570. Государственный комитет по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР. 1988.

12. Опытные-производственные работы по геологической съемке масштаба 1:500000 в юго-восточной части Балтийского моря. Научно-технический отчет. ВНИИМОРГЕО, Балтийская Морская Геолого-геофизическая Экспедиция, 1978.

13. Тупейко О. А. Использование гидрохимического метода обнаружения участков субмаринной разгрузки подземных вод в Балтийское море // Шаг в науку : сб. ст. Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2012. Вып. 2. Естественные науки, Гуманитарные науки. С. 32–39.

14. Юровский Ю. Г. Подземные воды шельфа. Задачи и методы изучения. Симферополь: ДиАйПи, 2013.

15. Юровский Ю. Г., Байсарович И. М. Гидрогеология прибрежной зоны Симферополь: ДиАйПи, 2005.

16. Bussmann I., Suess E. Groundwater seepage in Eckernförde Bay (western Baltic Sea): effect on methane and salinity distribution of the water column // Cont. Shelf Res. 1994. Vol. 18. P. 1795–1806.

17. Carman R., Rahm L. Early diagenesis and chemical characteristics of interstitial water and sediments in the deep deposition bottoms of the Baltic proper // J. Sea Res. 1997. Vol. 37. P. 24–47.

18. Idczak J., Brodecka-Goluch A., Łukawska-Matuszewska K. et al. A geophysical, geochemical and microbiological study of a newly discovered pockmark with active gas seepage and submarine groundwater discharge (MET1-BH, central Gulf of Gdansk, southern Baltic Sea) // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 742. P. 140306.

19. Krek A., Danchenkov A., Mikhnevich G. Morphological and chemical features of submarine groundwater discharge zones in the south-eastern part of the Baltic Sea // Russ. J. Earth. Sci. 2022. Vol. 22, iss. 4. ES4004. doi:10.2205/2021ES000776.

20. Krek A., Krechik V., Danchenkov A. et al. The role of fluids in the chemical composition of the upper holocene sediment layer in the russian sector of the South-East Baltic // Russian Journal of Earth Sciences, 2020. Vol. 20. ES6006. doi: 10.2205/2020ES000719.

21. Pimenov N. V., Ulyanova M. O., Kanapatsky T. A. et al. Microbially mediated methane and sulfur cycling in pockmark sediments of the Gdansk Basin, Baltic Sea // Geo-Mar Lett. 2010. Vol. 30 (3/4). P. 439–448. doi: 10.1007/s00367-010-0200-4.

22. Ulyanova M., Sivkov V., Kanapatskiy T. et al. Methane fluxes in the southeastern Baltic Sea // Geo-Mar Lett. 2012. Vol. 5 (32). P. 535–544.



23. Uścińowicz Sz., Szefer P., Sokotołowski K. Trace Elements in the Baltic Sea Sediments // Geochemistry of Baltic Sea surface sediments. Warsaw, 2011. P. 214 – 274.

Об авторах

Галина Сергеевна Михневич – канд. геогр. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: GMikhnevich@kantiana.ru

Екатерина Анатольевна Якимова – аспирант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: EAYakimova1@gmail.com

76

G. S. Mikhnevich, E. A. Yakimova

PROMISING METHODS FOR DETECTING SUBMARINE GROUNDWATER DISCHARGE IN THE BALTIC SEA AND EXPERIENCE OF THEIR APPLICATION

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Received 12 August 2023

Accepted 15 September 2023

doi: 10.5922/gikbfu-2023-3-5

To cite this article: Mikhnevich G.S., Yakimova E.A, 2023, Promising methods for detecting submarine groundwater discharge in the Baltic sea and experience of their application, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №3. P. 63 – 77. doi: 10.5922/gikbfu-2023-3-5.

Submarine discharge of groundwater (SDGW) is a hydrological process that typically occurs in coastal areas and is defined as the underwater inflow of fresh and brackish groundwater from the continent to the sea. The discharge of waters with a composition sharply different from seawater leads to the formation of hydrochemical anomalies in the near-bottom horizon and alters the composition of bottom sediments. Under different regional conditions, discharge can occur as a focused flow through cracks in karst and fissured rocks, as a diffuse flow in loose deposits, or through the recirculation of seawater in bottom deposits. Therefore, it is essential to consider local geological and hydrogeological conditions, as they can significantly influence the character and distribution of groundwater and, consequently, the possibility of submarine discharge and the likelihood of its detection. Despite the ubiquity of the SDGW process in the continental shelf zone, practical detection is often a challenging task. The aim of this study is to identify approaches that best allow for documenting the phenomenon of submarine discharge of groundwater in the southeast part of the Baltic Sea. Detecting submarine groundwater discharge in the Baltic Sea is crucial for understanding the processes in the water body and evaluating the ecological situation. The study examines various methods for detecting SDGW: computational-analytical, geophysical, radioisotopic, chemical, and biological. The experience of their application in the southeastern Baltic Sea is characterized, allowing for the identification of areas where submarine discharge of groundwater from Jurassic and Cretaceous horizons occurs. The conclusion is drawn that for effective detection of submarine discharge foci, a comprehensive approach involving various research methods is necessary.

Keywords: submarine discharge, groundwater, Baltic Sea, indicators, methods, anomalies



The authors

Dr. Galina S. Mikhnevich, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: GMikhnevich@kantiana.ru

Ekaterina A. Yakimova, PhD student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: EAYakimova1@gmail.com