

Департамент образования и науки города Севастополя
Государственное бюджетное образовательное учреждение
«Центр дополнительного образования
«Малая академия наук»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСТВОРЕННОГО НЕОРГАНИЧЕСКОГО ФОСФОРА
В МОРСКОЙ ВОДЕ**

Работу выполнил:

Савицкий Максим Андреевич
учащийся творческого объединения
«Творческая химия», ГБОУ ЦДО
«Малая академия наук»; семейное обуче-
ние, 11 класс;

Научный руководитель:

Бежин Николай Алексеевич,
педагог ДО, руководитель
творческого объединения «Творческая химия»,
ГБОУ ЦДО «Малая академия наук»,
к.т.н., руководитель пр. отдела «Биогеохимии
моря» ФГБУН ФИЦ МГИ РАН

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Раздел 1. Теоретический раздел	6
1.1 Круговорот фосфора в природе	6
1.2 Распределение фосфора в Черном море	11
1.3 Распределение фосфора в Севастопольской бухте	16
Раздел 2. Методика исследований	20
Раздел 3. Результаты исследований и их обсуждение	23
Выводы	26
Список использованной литературы	27

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В основе всех проявлений жизни на Земле лежат процессы обмена химическими элементами между организмами и окружающей их средой. Живые организмы не обладают строго определенным химическим составом, однако соотношение главных биогенных элементов – кислорода, углерода, водорода, азота, фосфора и серы – изменяется в достаточно узком диапазоне значений. Потребление биогенных элементов в «стехиометрических» соотношениях может приводить к возникновению дефицита того или иного элемента в окружающей среде. В таких случаях элемент с наибольшим дефицитом, согласно принципу Либиха, лимитирует биологическую продуктивность экосистем. Считается, что чаще всего лимитирующим компонентом оказывается фосфор. Этим объясняется большой интерес, проявляемый к изучению факторов, контролирующих миграцию фосфора в природных водах.

Части биосферы – атмосфера, гидросфера и верхняя часть литосферы – тесно связаны между собой процессами энергообмена, в которых особое место занимает круговорот воды, или глобальный гидрологический цикл. Именно в нем происходит перемещение основной массы веществ. Поэтому природные воды, образующие единую динамическую систему, без преувеличения можно сравнить с кровеносной системой организмов, обеспечивающей протекание основных жизненно важных процессов.

В XX веке, особенно во второй его половине, хозяйственная деятельность человека стала играть не менее значимую роль в геохимии фосфора, чем естественные факторы.

Отчетливо проявилось негативное влияние поступления фосфора из антропогенных источников на состояние окружающей среды и в первую очередь на интенсивность биологических процессов, следствием чего стала эвтрофикация не только континентальных водоемов, но также морей и океанов. Возникла необходимость в управлении потоками фосфора в масштабе всей биосферы, что

невозможно без глубоких знаний факторов и механизмов процессов, контролирующих миграцию фосфора в окружающей среде и, особенно, в глобальном гидрологическом цикле – основе структурно-функциональной организации биосферы.

Фосфор в природных водах представлен тремя основными группами: растворимый неорганический фосфор, растворимый нереакционноспособный органический фосфор и фосфор в частицах (отделяется от двух других при помощи фильтрования). Сумма первой и второй группы называется также растворимым фосфором, а сумма всех трех групп – общим фосфором.

Особый интерес вызывает растворимый неорганический фосфор, именно он в первую очередь участвует в биологических реакциях. Эта фракция фосфора в основном состоит из ортофосфатов (PO_4^{3-}), которые непосредственно используются для процессов фотосинтеза и могут существенно лимитировать рост водорослей, находясь в недостатке.

Целью работы является определение концентрации растворенного неорганического фосфора вдоль береговой линии Севастопольской бухты Черного моря и сравнение ее с концентрацией в относительно чистом месте у мыса Айя.

Для решения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- рассмотреть круговорот фосфора в природе;
- рассмотреть распределение фосфора в Черном море;
- отобрать пробы морской воды в Севастопольской бухте Черного моря и у мыса Айя;
- провести испытания по определению концентрации растворенного неорганического фосфора в Севастопольской бухте Черного моря и у мыса Айя;
- по полученным результатам сделать вывод.

Научная новизна данной работы состоит в том, что проведено изучение содержания фосфора вдоль береговой полосы Севастопольской бухты, в настоящее время такое определение проводится лишь в некотором удалении от берега. В тоже время необходимо отметить, что более точную картину поступления

фосфора в Севастопольскую бухту можно получить только при комплексном изучении, включающем отбор проб вдоль береговой полосы.

Объект исследования: концентрация фосфора в Севастопольской бухте.

Предмет исследования: растворенный неорганический фосфор.

Методы исследования. Использовались фотометрические методы анализа.

Личный вклад учащегося. Савицкий М.А., под руководством научного руководителя Бежина Н.А., принимал участие отборе и фильтровании проб, участвовал в проведении измерений и в процессе обработки данных, выполнял анализ полученных результатов.

Исследование проведено в Федеральном государственной бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН» в октябре – ноябре 2021 года.

РАЗДЕЛ 1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

1.1 Круговорот фосфора в природе

Глобальный круговорот фосфорсодержащих веществ протекает и на суше, и в Мировом океане: соединения фосфора встречаются в морской воде, горных породах, почвах, а также во всех живых организмах.

В свободном виде в естественной природе фосфор не встречается, а находится в виде полимерных анионов PO_4^{3-} . Важнейшие из фосфорсодержащих минералов – это ортофосфаты кальция: апатит $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3[\text{F}, \text{OH}, \text{Cl}]$ и фосфорит $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Минеральные породы, содержащие запасы малоподвижных ортофосфатов, в процессе разрушения (эрозии) и миграции передают анионы PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- наземным и водным экосистемам [1].

На суше большая часть фосфора содержится в минералах и горных породах. Как правило, богатые фосфором отложения образуются в океане или из гуано, и со временем геологические процессы переносят на сушу океанские отложения. Выветривание минералов и горных пород высвобождает фосфор в растворимой форме, где он усваивается растениями и превращается в органические соединения. Эти растения могут потребляться травоядными животными, и фосфор или проникает в их ткани, или выводится из организма. После смерти растение или животное разлагается, и фосфор возвращается в почву, где большая часть фосфора превращается в нерастворимые соединения. Сток может унести обратно в океан небольшую часть фосфора. Как правило, со временем (тысячи лет) почвы испытывают дефицит фосфора, что ведет к регрессии экосистем [2]. Круговорот фосфора в природе представлен на рис. 1.1.

Круговорот фосфора в природе существенно отличается от биогеохимических циклов других биогенных макроэлементов: углерода, кислорода, азота, так как газообразные соединения фосфора практически не принимают участия

в его миграции. Кроме того, значительные количества фосфатов в виде гидро-, дигидроанионов HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- оказываются вовлеченными в круговорот воды, когда происходит гидролиз и вынесение в моря и океаны, т.е. главный цикл фосфора в природной среде идет между гидросферой ($\approx 10^{12}$ тонн) и литосферой (содержание $\approx 0,09\%$) [3].



Рисунок 1.1 – Круговорот фосфора в природе

В целом, на Земле для соединений фосфора присуща тенденция выноса из материков в форме водных растворов и взвесей в Мировой Океан, где они накапливаются в составе отложений. Вновь вернуться в геобиохимический круговорот фосфор может только в результате тектонических процессов, растягивающихся на сотни миллионов лет. Глобальные смещения земной коры: поднятие морского дна и опускание материков приводят к тому, что накопленные на дне океанов и морей фосфаты снова возвращаются на сушу. Таким образом «резервуаром» фосфора, из которого этот элемент извлекается в биогеохимический круговорот, являются апатиты литосферы.

Фосфаты довольно быстро перемещаются через растения и животных, однако процессы, которые перемещают их через океан или почву, идут доволь-

но медленно, что в целом делает цикл фосфора одним из самых медленных биогеохимических циклов [4].

Глобальный цикл фосфора включает в себя четыре основных процесса:

1. Тектоническое поднятие и воздействие фосфорсодержащих пород, таких как апатит, на поверхностное выветривание [5].

2. Физическая эрозия, химическое и биологическое выветривание фосфорсодержащих пород для обеспечения почвы растворенным и твердым фосфором озер и рек [6].

3. Речной и подземный перенос фосфора в различные озера и сток в океан.

4. Осаждение твердых частиц фосфора (например, фосфора, связанного с органическим веществом и оксидными/карбонатными минералами) и, в конечном счете, захоронение в морских отложениях (этот процесс также может происходить в озерах и реках) [4].

Биологический круговорот фосфатов осуществляется посредством почвы – важнейшего компонента биогеоценозов. Для растений наиболее доступным является фосфаты гумуса, именно им отводится главная роль в малом (локальном) биологическом цикле фосфора. Круговорот органического фосфора в почве формируется при разложении мертвых организмов и продуктов их жизнедеятельности: редуценты минерализуют органические соединения фосфора умерших организмов и экскреций в «мобильные» фосфаты, которые вновь поглощаются корнями автотрофных растений. Хотя и общее количество органических соединений фосфора и фосфатов в живой клетке является незначительным ($\approx 0,1\%$), но они имеют важнейшую биохимическую роль *in vivo* (например, формируют макромолекулярную структуру нуклеиновых кислот, а также кости) в организме. Фосфолипиды биомембран живых клеток обеспечивают избирательную проницаемость, комплементарное структурообразование и стабилизируют наноструктуру [7].

Для растений дефицит фосфора объясняется низкой физиологической доступностью его ортофосфатов, нерастворимых в почве. Экспериментальные

данные говорят о том, что содержание анионов PO_4^{3-} в лесных подстилках может достигать 100 кг/га [8]. Из-за вырубki лесов, уничтожения лесной подстилки и замены лесных экосистем агроландшафтами идут необратимые изменения круговорота фосфора в биосфере. Техногенные нарушения цикла фосфатов идут также и в гидросфере. Вмешательство человека в фосфорный цикл происходит из-за неосторожного или чрезмерного применения фосфорных удобрений. Это ведет к повышению количества фосфора в водных объектах в качестве загрязняющих веществ, что приводит к эвтрофикации (рис. 1.2). Эвтрофикация разрушает водные экосистемы, вызывая анакисические условия.



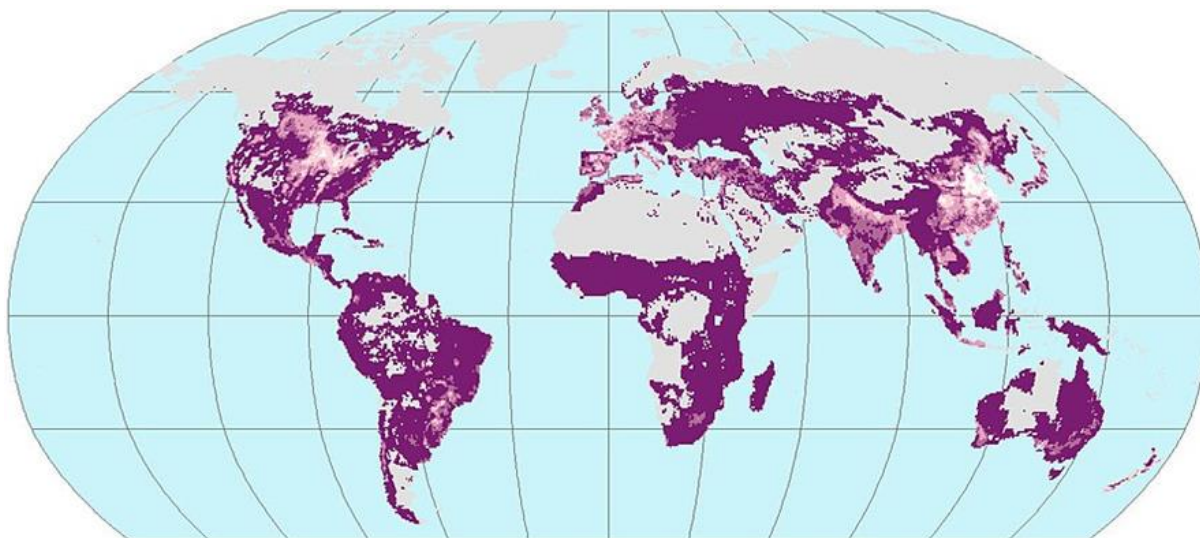
Рисунок 1.2 – Эвтрофикация водоемов

Эвтрофикация – это обогащение воды питательными веществами, которые приводят к структурным изменениям водной экосистемы, таким как цветение водорослей, обезвоживание, сокращение видов рыб. Основным источником, способствующим эвтрофикации, считаются азот и фосфор. Когда эти два элемента превышают пропускную способность водного объекта, происходит эвтрофикация. Фосфор, попадающий в озера, будет накапливаться в отложениях и биосфере, он также может быть переработан из отложений и водной системы. Дренажная вода с сельскохозяйственных угодий также содержит фосфор и азот. Поскольку в почве содержится большое количество фосфора, по-

этому чрезмерное использование удобрений и чрезмерное обогащение питательными веществами приведет к увеличению концентрации фосфора в сельскохозяйственном стоке. Когда эродированная почва попадает в озеро, как фосфор, так и азот в почве способствуют эвтрофикации и эрозии, вызванной вырубкой лесов, которая также является результатом неконтролируемого планирования и урбанизации [9].

На сегодняшний день количество соединений фосфора в геобиоценозе, поступающего в результате производственной деятельности людей, составляет величину такого же порядка, что и естественных процессов. В результате разработки месторождений апатитов, фосфоритов (более 20 млн. тонн ежегодно) и другой техногенной деятельности наибольшему воздействию подвергается верхний слой суши и прибрежные воды.

При интенсивной сельскохозяйственной деятельности потери фосфорсодержащих веществ в полях становятся практически необратимыми, а компенсация возможна только за счёт внесения фосфорных и других удобрений (рис. 1.3). Фосфорные удобрения: суперфосфат $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, аммофос $\text{NH}_4(\text{H}_2\text{PO}_4)$ и других стимулируют возрастание продуктивности аграрных культур. В тоже время часто дождевые потоки «уносят» значительное количество удобрений (азота, калия, фосфора), вносимых на поля.



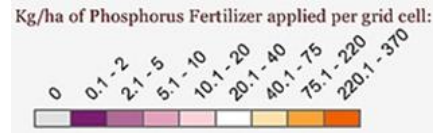


Рисунок 1.3 – Применение фосфорных удобрений

Кроме того, большие количества органических соединений фосфора попадают в среду обитания со стоками животноводческих ферм, а также со сточными водами городов совместно с моющими средствами (пентанатрийдифосфат добавляют для уменьшения жесткости воды). Повторное внесение навоза в избытке для удовлетворения потребностей сельскохозяйственных культур также может оказать пагубное воздействие на состояние фосфора в почве (рис. 1.4). Поэтому в настоящее время мобилизация соединений фосфатов становятся одним из важнейших факторов загрязнения озерных и речных вод, следовательно инновационные технологии должны быть направлены на уменьшение этого прессинга.

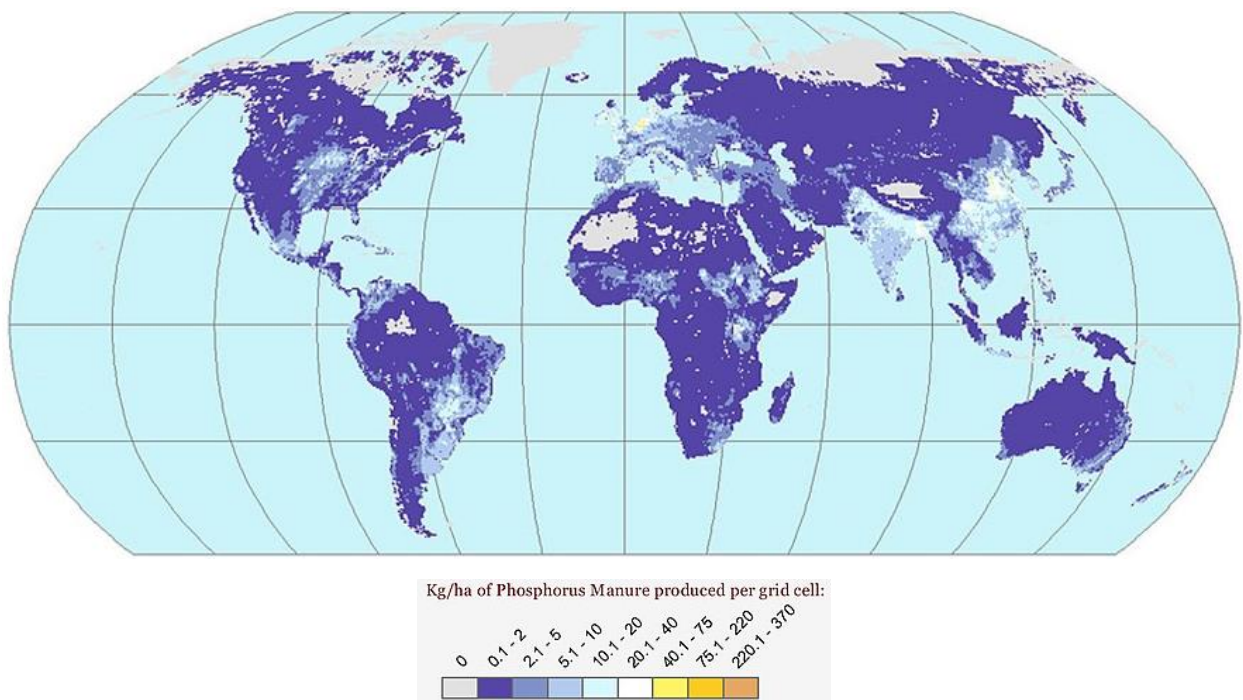


Рисунок 1.4 – Фосфор в производстве навоза

Таким образом потоки геобиосферной миграции соединений фосфора в третьем тысячелетии трансформируются антропогенными факторами.

1.2 Распределение фосфора в Черном море

Фосфор в природных водах представлен тремя основными группами: растворимый неорганический фосфор, растворимый нереакционноспособный органический фосфор и фосфор в частицах (отделяется от двух других при помощи фильтрования). Сумма первой и второй группы называется также растворимым фосфором, а сумма всех трех групп – общим фосфором.

Фосфор является одним из ключевых биогенных элементов, содержание неорганических соединений которого в среде контролирует первично-продукционные процессы в пресноводных и морских экосистемах. Биотический круговорот фосфора в верхнем продуктивном слое вод включает потребление его низкомолекулярных, главным образом неорганических, соединений фито- и бактериопланктоном, регенерацию этих соединений в процессах жизнедеятельности планктонных организмов, а также минерализацию органического фосфора до фосфатов, которые находятся в воде в виде анионов ортофосфорной кислоты, преимущественно в виде аниона HPO_4^{2-} .

В кислородсодержащих водах на дне значительное количество фосфора связывается в осадках с гидратированными фосфатами железа(III) или кальция (фторапатит $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$). Однако в условиях аноксии связывание фосфора с железом в общем является относительно малым вследствие восстановительного растворения оксидов и гидроксидов железа(III) и освобождения связанного фосфора в виде фосфатов, хотя последние могут связываться с железом(II), образуя вивианит $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$.

Для Черного моря и других водоемов, в которых непосредственно наблюдается полное отсутствие или дефицит кислорода (например, впадина Кариакко, Балтийское море, норвежские фиорды), растворение фосфатов, осевших на оксидах-гидроксидах железа(III), в восстановительных условиях является особенно важным, так как идет на границе появления сероводорода в водной толще [10]. Циклы фосфора, серы и переходных металлов (марганец и железо), которые на границе соприкосновения сероводородной и кислородной зон вовлека-

ются в окислительно-восстановительные процессы, оказываются тесно связанными.

В донных осадках окислительно-восстановительные превращения идут в масштабе нескольких сантиметров, в глубоководной части Черного моря эти процессы растянуты в водной толще по вертикали на метры.

К самой важной особенности вертикального профиля фосфатов в Черном море относится промежуточный максимум их концентрации на изопикнической поверхности $16,2 \text{ кг/м}^3$ [11]. Считается, что, хотя и данный максимум не может служить реперной точкой для глобальной оценки потоков фосфора в Черном море [12], но его значение в результате процессов в фотической зоне моря будет изменяться. Развитие эвтрофикации Черного моря в начале 70-х гг. привело к тому, что максимум фосфатов, располагавшийся в 1969 г. на изопикне $16,4 \text{ кг/м}^3$, составлял менее 6 мкМ, в 1990 г. он был зафиксирован на изопикне $16,2 \text{ кг/м}^3$ и его значение повысилось до приблизительно 7,5 мкМ [11]. Это же значение максимума оставалось практически неизменной в исследованиях 1995–2015 гг. (рис. 1.5) [13–14].

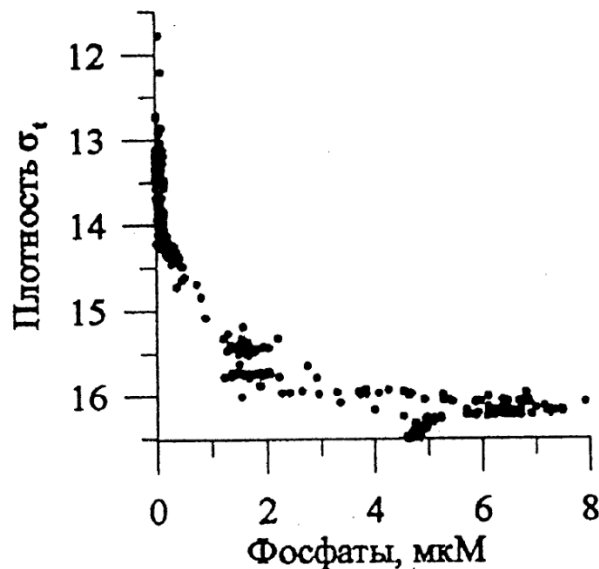


Рисунок 1.5 – Вертикальное распределение фосфора Черном море в 2004 г. [13]

Последние подробные исследования концентрации фосфатов в Черном море были выполнены в экспедиции НИС «Профессор Колесников» в 1995 г.

[11], после чего такие определения проводились эпизодически. В частности, было исследовано распределение фосфатов в антициклоническом вихре над континентальным склоном в районе северо-западного шельфа в 2004 г. (рис. 1.5).

В 2015 были возобновлены экспедиционные исследования в Черном море в пределах экономической зоны России, в которых изучалась концентрация фосфатов и растворенного органического фосфора. Были построены вертикальные профили соединений фосфора (рис. 1.6) [15]. Концентрация фосфатов и органического фосфора от поверхности до изопикны $14,4 \text{ кг/м}^3$ не превышала $0,1 \text{ мкМ}$, ниже содержание фосфатов повышалось, а органического фосфора оставалось примерно на том же уровне.

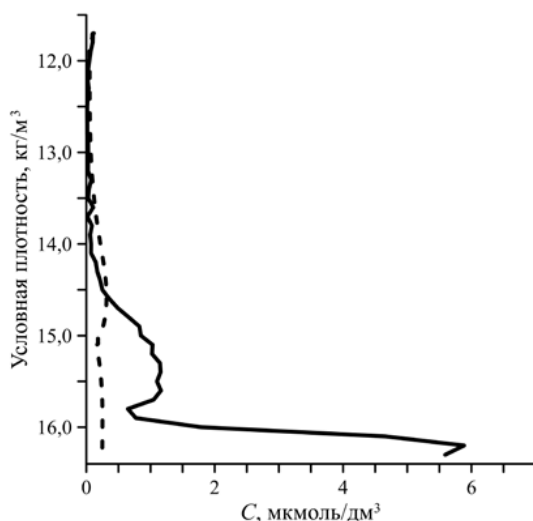


Рисунок 1.6 – Осредненное вертикальное распределение в Черном море в поле плотности фосфатов (сплошная линия) и органического фосфора (штриховая) по данным за 2016–2017 гг. [15]

Поскольку в верхнем продуктивном слое вод концентрация фосфатов мала и слабо изменяется с глубиной, приведенные на рис. 1.7 вертикальные профили и распределения на разрезах начинаются с $14,0 \text{ кг/м}^3$ и заканчиваются на изопикне $16,3 \text{ кг/м}^3$.

Установлено, что максимальная концентрация фосфатов в Черном море в 1995 и 2004 гг. лежала в пределах $7,0 - 7,5 \text{ мкМ}$. В 2016 – 2017 гг. оно не пре-

вышло 8 мкМ, то есть за 23 года с 1995 по 2017 гг. максимальная концентрация фосфатов на границе сероводородной зоны оставалась практически постоянной, не достигая 8 мкМ.

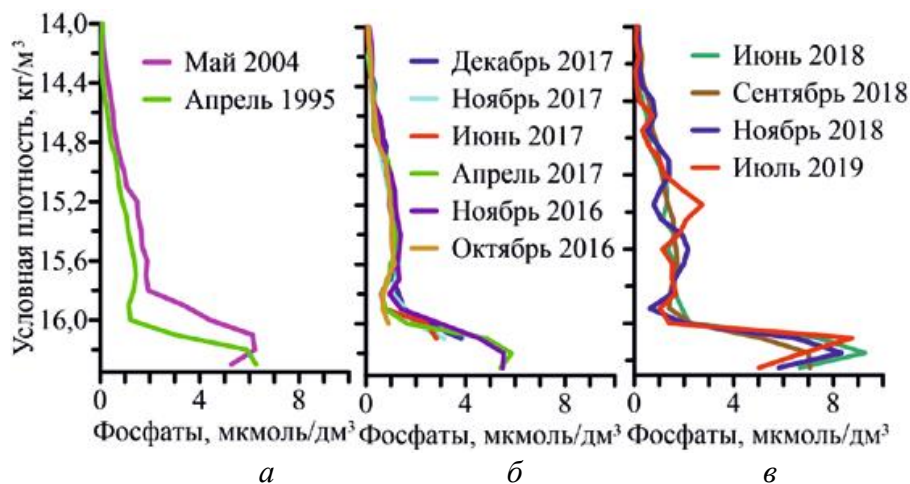


Рисунок 1.7 – Осредненные вертикальные профили фосфатов (мкМ) по результатам исследований МГИ в 1995, 2004 гг. (а) и в 2016–2019 гг. (б, в) [15]

Однако в 2018 г. концентрация фосфатов неожиданно повысилась и в отдельных случаях составила 12 мкМ (рис. 1.8), а южнее Керченского пролива составила 17 мкМ [15].

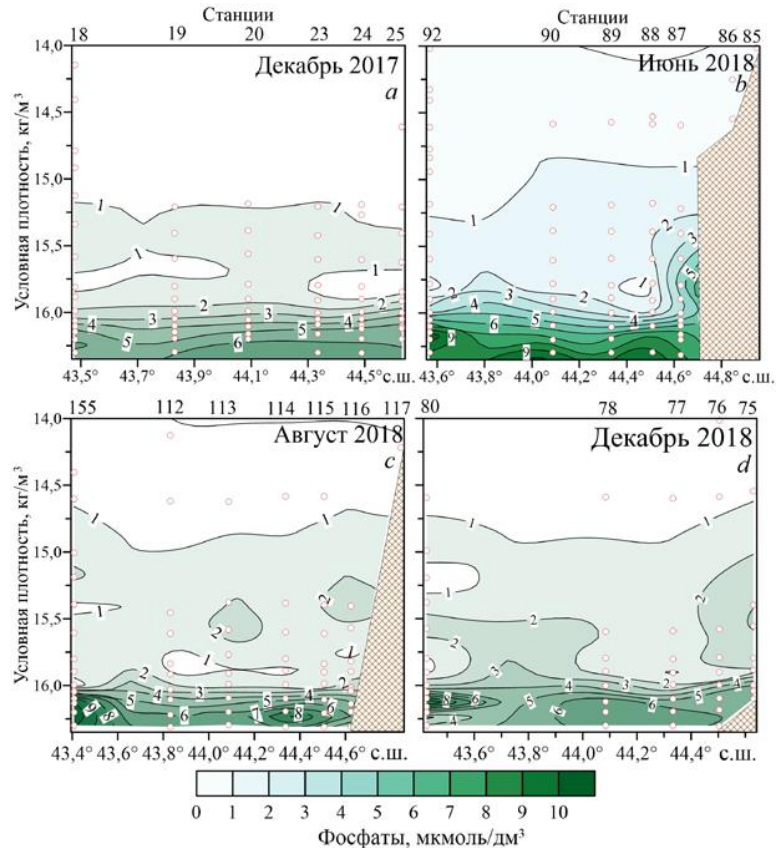


Рисунок 1.8 – Распределение фосфатов на разрезе 4 к югу от Керченского пролива в декабре 2017 г. – декабре 2018 г. [15]

Концентрации, превышающие 8 мкМ, были установлены во всех трех съемках 2018 года, то есть они не были каким-то единичным выбросом из массива данных, получившись в результате аналитической ошибки. Такое повышение значений на верхней границе сероводородной зоны связано с дополнительным поступлением неорганических соединений фосфора в результате работ по возведению Керченского моста [15].

1.3 Распределение фосфора в Севастопольской бухте

Севастопольская бухта является зоной интенсивного судоходства, а также местом стоянки и ремонтной базой судов, поэтому она может считаться типичным примером акватории с высоким уровнем антропогенной нагрузки. Дополнительный поток биогенных элементов и легко окисляемого органического вещества обеспечивают входящие в акваторию бухты аварийные канализационные и хозяйственно-бытовые стоки, а также поступление вод реки Черной в ее

верховье. Заградительный мол на выходе из бухты приводит к уменьшению водообмена с открытой частью моря.

В Севастопольской бухте регулярно проводится анализ содержания биогенных элементов и, в частности, фосфора. Карта станций отбора проб приведена на рис. 1.9.



Рисунок 1.9 – Схема расположения станций отбора проб в Севастопольской бухте

В период наблюдений в 2004 – 2005 гг. концентрация минерального фосфора колебалась в широких пределах – от аналитического нуля до 1,6 мкМ в поверхностных водах и от 0 до 0,74 мкМ в придонном слое. В среднем концентрация фосфатов в водах поверхностного стоя составляла (мкМ): весной – 0,12; летом – 0,05; осенью – 0,13, зимой – 0,10; В придонном слое средние значения минерального фосфора в зависимости от интенсивности внутриводоемных процессов могут быть выше (летом) или ниже (весной) примерно на 0,1 мкМ. Из рис. 1.10 видно, что в пространственном распределении фосфатов как в холодный, так и в теплый периоды имеются обширные зоны, где их практически нет [16].

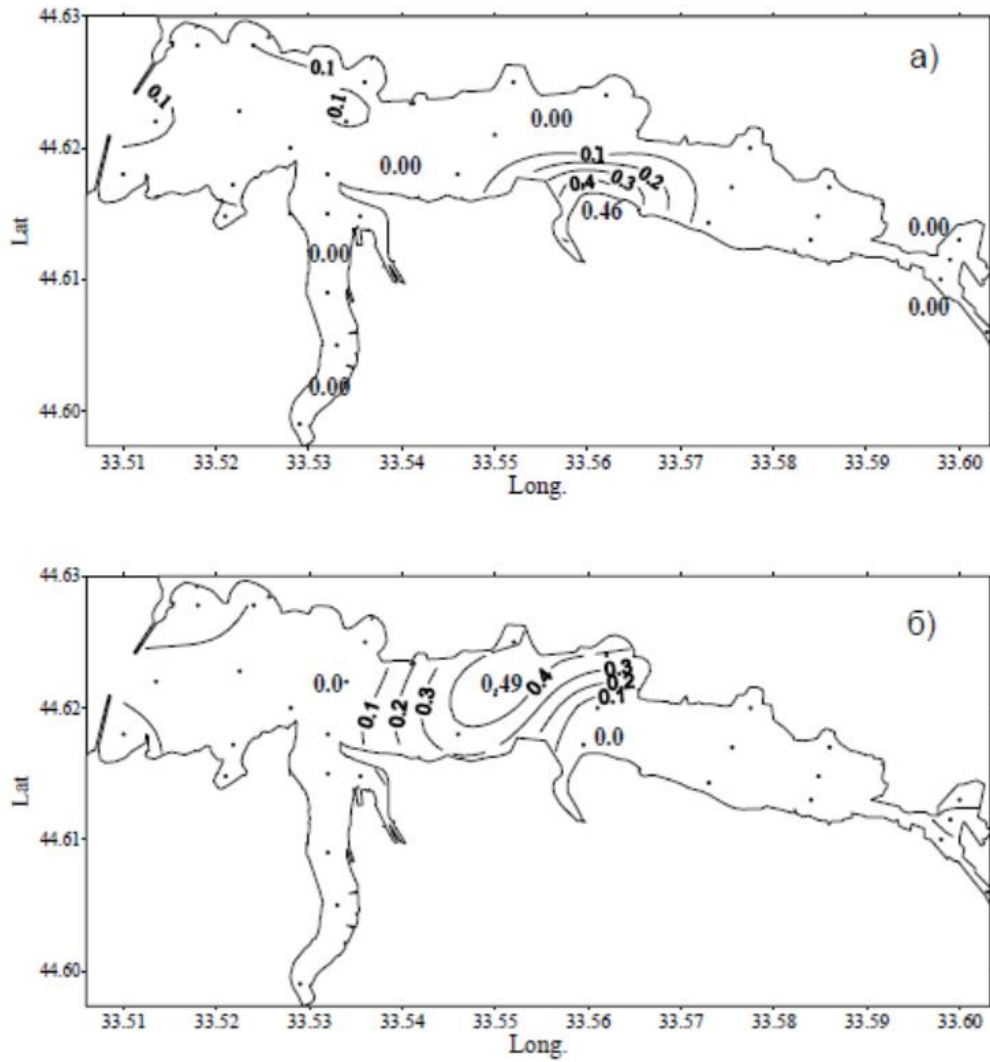
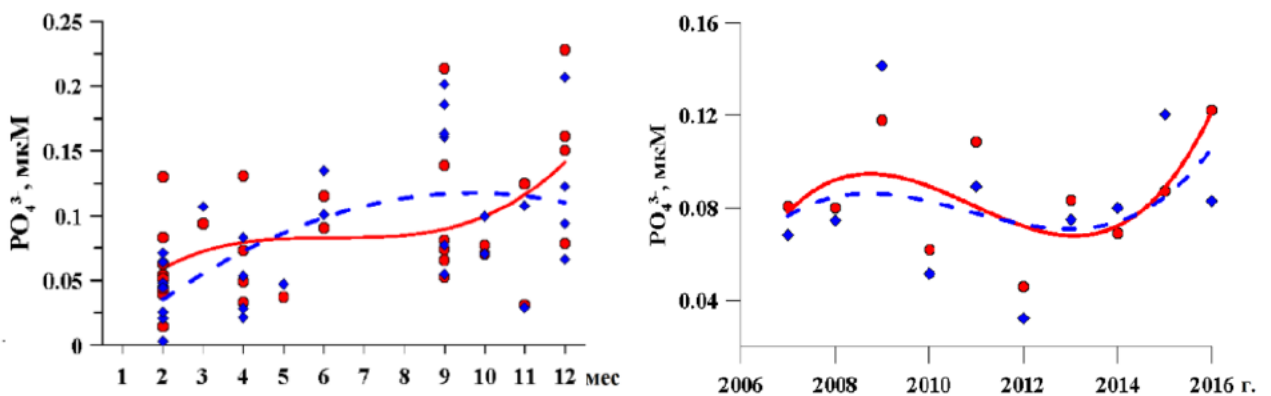


Рисунок 1.10 – Минеральный фосфор (мкМ) в поверхностном слое бухты летом 2004 г. (а) и зимой 2005 г. (б) [16]

На рис. 1.11 представлены усредненные данные внутри- и межгодового изменения концентрации фосфатов в поверхностном и придонном слоях Севастопольской бухты в период 2006 – 2016 гг [17].



*a**б*

Рисунок 1.11 – Внутри- (*a*) и межгодовое (*б*) изменение концентрации фосфатов в Севастопольской бухте (красным цветом показано распределение в поверхностном слое, синим – в придонном) [17]

В содержании фосфатов на обоих горизонтах (поверхностном и придонном) видна тенденция к повышению от зимнего периода к осеннему. Резкий рост содержания в поверхностном слое виден поздней осенью, в придонном – летом. При этом наибольшая концентрация на поверхности превышала в 2 раза зимний минимум, а у дна – в 3 раза. В зимний и осенний периоды содержание фосфатов в поверхностном слое было больше, чем в придонном, а в летний период, напротив, среднее содержание на придонном горизонте было выше содержания на поверхности более чем на 60%, что в существенной мере является причиной усвоения фосфатов фитопланктоном. Сезонная стратификация вод бухты обеспечивает поддержание данного различия. Следует отметить, что подобные сезонные изменения содержания фосфатов несколько противоречат известной закономерности, согласно которой наибольшее содержание приходится на зимний период вследствие выноса из подстилающих слоев, а также незначительного потребления фосфатов; с увеличением температуры от весеннего периода к летнему концентрация фосфатов должна резко падать из-за уменьшения гидродинамического-го воздействия и их активного потребления в результате фотосинтеза. Подобное несоответствие вероятнее всего обусловлено наличием дополнительных источников фосфатов антропогенного происхождения [17].

В изменении концентрации фосфатов в водах Севастопольской бухты проглядываются три периода: повышение содержания от 2007 к 2009 г. в 1,5–2 раза на поверхности и у дна, его последующее уменьшение к 2012 г. и резкое повышение к 2016 г. При этом и в поверхностном, и в придонном слое концентрация фосфатов в 2016 г. в 2,5 раза была выше, чем в 2012 г.

Таким образом, на содержание растворенного неорганического фосфора в Севастопольской бухте Черного моря влияет много факторов, поэтому изуче-

ние данного содержания является актуальной задачей. Кроме того, необходимо отметить, что в настоящее время не проводится изучение содержания фосфора вдоль береговой полосы Севастопольской бухты, а лишь в некотором удалении от берега, что наглядно видно на рис. 1.9, в тоже время более точную картину поступления фосфора в Севастопольскую бухту можно получить только при комплексном изучении, включающем отбор проб вдоль береговой полосы.

РАЗДЕЛ 2

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Отбор проб. На первом этапе отбирали пробы морской воды (рис. 2.1) в Севастопольской бухте Черного моря и на мысе Айя. Точки отбора проб приведены на карте на рис. 2.2.



Рисунок 2.1 – Отбор проб

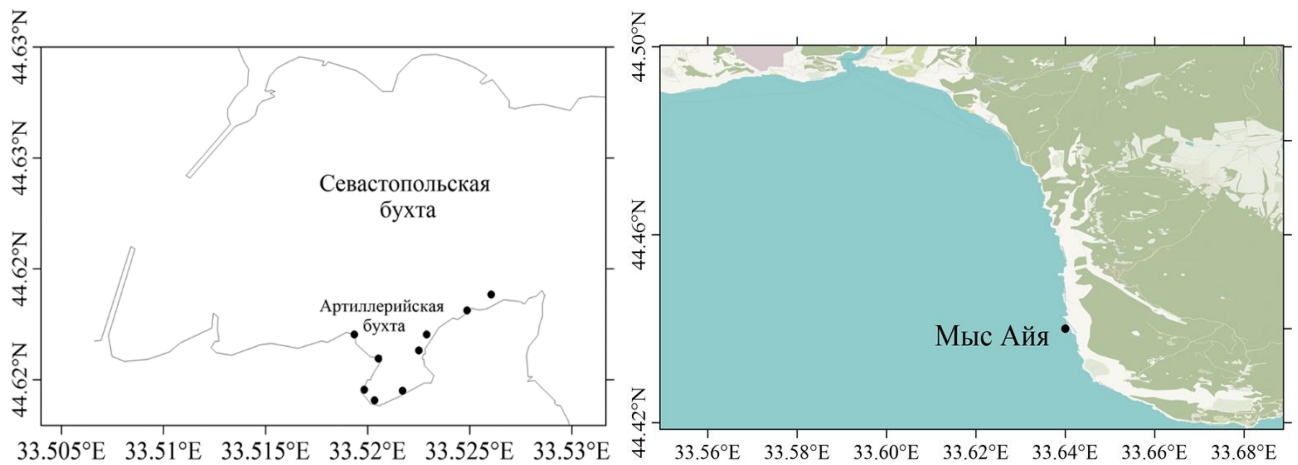


Рисунок 2.2 – Места отбора проб

Фильтрация проб. Отобранные пробы фильтровали через мембранные фильтры на основе ацетата целлюлозы с размером пор 0,45 мкм с использованием поликарбонатной системы для вакуумной фильтрации и лабораторного вакуумного насоса (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Фильтрация проб

Определение концентрации фосфора. Для определения фосфора использовали аскорбиновую кислоту и смешанный реактив на основе раствора аммония молибденовокислого, раствора серной кислоты и раствора калия сурьмяновиннокислого (рвотного камня).

К смешенному реактиву добавляли аскорбиновую кислоту в соотношении 4 к 1.

Отбирают по 10 мл аликвоты исследуемых проб, а также две пробирки по 10 мл дистиллированной воды для холостых проб.

К отобранным аликвотам, в том числе и к холостой пробе, прибавляют по 1 мл смеси аскорбиновой кислоты и смешанного реактива. Растворы тщательно перемешивают и оставляют на 10 мин.

Через 10 мин измеряют оптическую плотность растворов в кюветах размером 5 см на 1 см на фотоэлектроколориметре КФК-3 при длине волны 880 нм относительно холостого раствора (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Анализ проб

Принцип действия фотоэлектроколориметра основан на сравнении светового потока, прошедшего через бесцветный растворитель, и светового потока, прошедшего через окрашенный раствор. Световые потоки фотоприемника преобразуются в электрические сигналы, которые обрабатываются микроЭВМ прибора и высвечиваются на цифровом табло в виде оптической плотности.

Полученные значения оптической плотности заносятся в лабораторный журнал.

РАЗДЕЛ 3

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в ходе замеров данные обрабатывались по установленной методике следующим образом.

По измеренным значениям оптической плотности определяли молярную концентрацию фосфора (C_M , мкмоль/л) в морской воде по формуле (3.1):

$$C_M = k \cdot D, \quad (3.1)$$

где D – оптическая плотность;

k – коэффициент пересчета оптической плотности в молярную концентрацию, определенный по градуировочной зависимости ($k = 10$).

Молярную концентрацию фосфора переводили в массовую (C , мг/л) по формуле (3.2):

$$C = \frac{C_M \cdot M}{1000}, \quad (3.2)$$

Полученные данные сводят в таблицу 3.1 и отображают на карте (рис. 3.1).

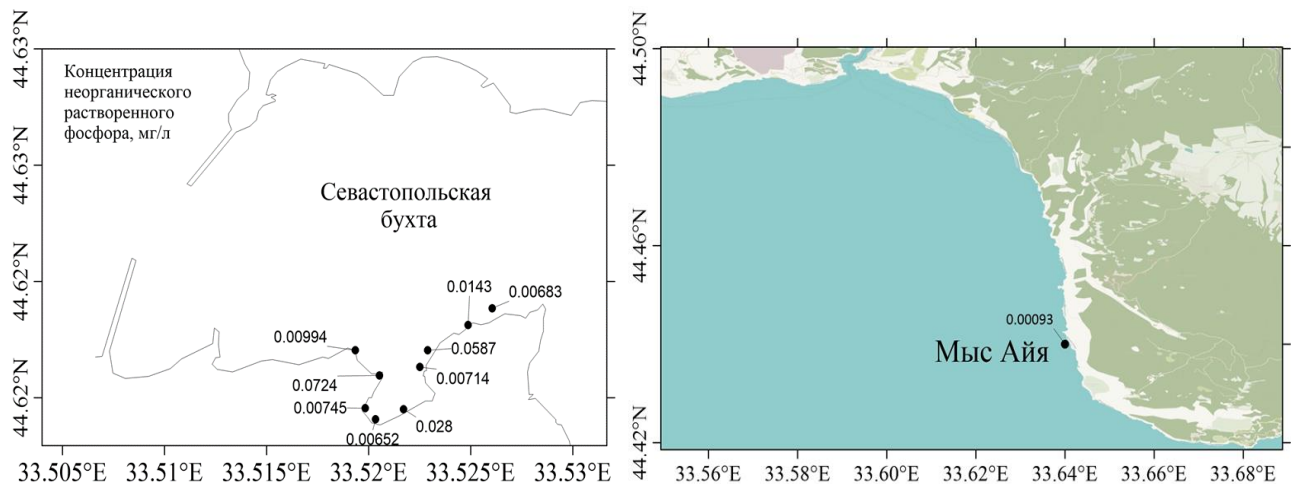


Рисунок 3.1 – Результаты определения содержания растворенного неорганического фосфора в Севастопольской бухте и у м. Айя

Таблица 3.1

**Результаты анализа концентрации фосфора
в Севастопольской бухте и на мысе Айя**

Координаты		<i>D</i>	<i>C_M</i> , мкмоль/л	<i>C</i> , мг/л
С.Ш.	В.Д.			
44°61'70"	33°52'29"	0,189	1,89	0,05870
44°61'46"	33°51'98"	0,024	0,24	0,00745
44°61'41"	33°52'03"	0,021	0,21	0,00652
44°61'70"	33°51'93"	0,032	0,32	0,00994
44°61'81"	33°52'49"	0,046	0,46	0,01430
44°61'60"	33°52'05"	0,234	2,34	0,07240
44°61'63"	33°52'25"	0,023	0,23	0,00714
44°61'89"	33°52'61"	0,022	0,22	0,00683
44°61'45"	33°52'17"	0,090	0,90	0,02800
44°44'09"	33°64'33"	0,003	0,03	0,00093

В результате была установлена концентрация растворенного неорганического фосфора в Севастопольской бухте Черного моря. Также было проведено сравнение данной концентрации с концентрацией в относительно чистом месте на мысе Айя.

Наглядно видно, что концентрация фосфора на мысе Айя значительно ниже концентрации фосфора в Севастопольской бухте. Также следует отметить повышенные концентрации фосфора в местах впадения ливневых стоков, а именно в Артиллерийской бухте и рядом с Севастопольским Аквариумом.

При сравнении полученных результатов с предельно-допустимой концентрацией (ПДК), представленной в документе «Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения», а также в сравнении с классами загрязнений, предложенными Государственным океанологическим институтом имени Н.Н. Зубова

(таблица 3.2) [18], видно, что концентрация фосфора в Севастопольской бухте значительно ниже ПДК.

Таблица 3.2

**Предельно допустимая концентрация и классы загрязнения
растворенным неорганическим фосфором в морских водах [18]**

Водоемы	ПДК, мг/л	Классы загрязнения	
		Высокое загрязнение (ВЗ), мг/л	Экстремально высокое загрязнение (ЭВЗ), мг/л
олиготрофные	0,05	–	–
мезотрофные	0,15	$\geq 1,5$	$\geq 7,5$
эвтрофные	0,2	$\geq 2,0$	$\geq 10,0$

ВЫВОДЫ

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Концентрация растворенного неорганического фосфора в Севастопольской бухте значительно выше концентрации на мысе Айя.

2. Концентрация фосфора в прибрежной части Севастопольской бухте значительно ниже ПДК. То есть несмотря на большой муниципальный сток в Севастопольскую бухту, содержание фосфора находится на уровне олиготрофных водоемов, что связано с высоким потреблением фосфора фитопланктоном из-за относительно небольшой глубины бухты и хорошей прогреваемости.

3. В дальнейшем в рамках выполнения данной работы планируется продолжение исследования проб морской воды в Севастопольской бухте, поскольку содержание фосфора может подвергаться сезонным изменениям, изменениям, связанным с антропогенными воздействиями. Кроме того, необходимо отметить, что в настоящее время не проводится изучение содержания фосфора вдоль береговой полосы Севастопольской бухты, а лишь в некотором удалении от берега, в тоже время более точную картину поступления фосфора в Севастопольскую бухту можно получить только при комплексном изучении, включающем отбор проб вдоль береговой полосы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adediran G.A. Phosphorus in 2D: Spatially resolved P speciation in two Swedish forest soils as influenced by apatite weathering and podzolization / G.A. Adediran, J.R. Marius Tuyishime, D. Vantelon, W. Klysubun, J.P. Gustafsson // *Geoderma*. – 2020. – Vol. 376. – 114550.
2. Buendía C. The role of tectonic uplift, climate, and vegetation in the long-term terrestrial phosphorous cycle / C. Buendía, A. Kleidon, A. Porporato // *Biogeosciences*. – 2010. – Vol. 7. – P. 2025–2038.
3. Conley D.J. Ecology. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus / D.J. Conley, H.W. Paerl, R.W. Howarth, D.F. Boesch, S.P. Seitzinger, K.E. Havens, C. Lancelot, G.E. Likens // *Science*. – 2009. – Vol. 323 (5917). – P. 1014–1015.
4. Konovalov S.K. Variations in the chemistry of the Black Sea on a time scale of decades (1960–1995) / S.K. Konovalov, J.W. Murray // *Journal of Marine Systems*. – 2001. – Vol. 31, No. 1–3. – P. 217–243.
5. Kraal P. Turbidite deposition and diagenesis in the southwestern Black Sea: Implications for biogeochemical cycling in an anoxic basin / P. Kraal, M. Yücelb, C.P. Slompa // *Marine Chemistry*. – 2019. – Vol. 209. – P. 48–61.
6. Oelkers E.H. Phosphate mineral reactivity: from global cycles to sustainable development / E.H. Oelkers, E. Valsami-Jones, T. Roncal-Herrero // *Mineralogical Magazine*. – 2008. – Vol. 72, No. 1. – P. 337–340.
7. Peltzer D.A. Understanding ecosystem retrogression / D.A. Peltzer, D.A. Wardle, V.J. Allison, W.T. Baisden, R.D. Bardgett, O.A. Chadwick, L.M. Condrón, R.L. Parfitt, S. Porder, S.J. Richardson, B.L. Turner, P.M. Vitousek, J. Walker, L.R. Walker // *Ecological Monographs*. – 2010. – Vol. 80, No. 4. – P. 509–529.
8. Tuğrul S. Spatial and temporal variability in the chemical properties of the oxic and suboxic layers of the Black Sea / S. Tuğrul, J.W. Murray, G.E. Friederich, İ. Salihoğlu // *Journal of Marine Systems*. – 2014. – Vol. 135. – P. 29–43.

9. Vitousek P.M. Element interactions in forest ecosystems: succession, allometry and input-output budgets / P.M. Vitousek, T. Fahey, D.W. Johnson, M.J. Swift // *Biogeochemistry*. – 1988. – Vol. 5, No. 1. – P. 7–34.
10. Добровольский В.В. Основы биогеохимии / В.В. Добровольский. – М: Изд. центр «Академия», 2003. – 400 с.
11. Иванов В.А. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В.А. Иванов, Е.И. Овсяный, Л.Н. Репетин, А.С. Романов, О.Г. Игнатьева. – Севастополь: МГИ, 2006. – 90 с.
12. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2015 / Под ред. Коршенко А.Н. – М.: Наука, 2016. – 184 с.
13. Кондратьев С.И. Вертикальное распределение форм фосфора в Черном море по экспедиционным данным 2016-2019 годов / С.И. Кондратьев, Д.С. Хоружий // *Морской гидрофизический журнал*. – 2021. – Т. 37, № 5. – С. 579–590.
14. Кондратьев С.И. Особенности распределения гидрохимических характеристик в районе материкового склона северо-западной части Черного моря / С.И. Кондратьев, А.С. Романов, Ю.Л. Внуков // *Морской гидрофизический журнал*. – 2007. – № 5. – С. 69–79.
15. Коновалов С.К. Региональные особенности, устойчивость и эволюция биогеохимической структуры вод Черного моря / С.К. Коновалов, В.Н. Еремеев // *Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря*. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – С. 273–299.
16. Орехова Н.А. Современный гидрохимический режим Севастопольской бухты / Н.А. Орехова, А.В. Вареник // *Морской гидрофизический журнал*. – 2018. – Т. 34, № 2. – С. 134–146.
17. Халиков Р.М. Зависимость наноструктуры биомембран от стабилизирующего влияния полиеновых липидов / Р.М. Халиков // *Nauka-Rastudent.ru*. – 2014. – № 1(01). – С. 4.

- 18.Халиков Р.М. Круговорот соединений фосфора в природе / Р.М. Халиков, О.В. Иванова // Международный научный журнал «Инновационная наука». – 2016. – № 1. – С. 143–145.