

4.2. Биогенные элементы атмосферных выпадений и их влияние на поверхностные воды Черного моря

А.В. Вареник, С.К. Коновалов

Введение

Азот, фосфор и кремний являются важными биогенными элементами, которые чаще всего лимитируют развитие продуктивности водных экосистем, а их соотношение определяет в значительной степени доминирующие формы и условия цветения фитопланктона. Экологические последствия гиперэвтрофикации морской среды выражаются в изменении естественных биогеоценозов, нарушении циклов углерода и биогенных элементов, неконтролируемом росте биомассы фитопланктона, развитии болезнетворных и ядовитых форм фитопланктона, массовом развитии желетелых, возникновении обширных зон дефицита кислорода и сероводородного заражения. Интенсивное развитие промышленности и рост городов приводят к увеличению антропогенного воздействия на окружающую среду. Биогенные вещества поступают в Черное море с промышленными отходами, сельскохозяйственными, речными и бытовыми стоками, в процессе морских перевозок и добычи полезных ископаемых, а также в результате выпадения атмосферных осадков.

Атмосферный перенос загрязняющих веществ существенно влияет на глобальное распространение химических веществ. Еще в 1995 г. в работе [Jickells, 1995] были рассмотрены публикации, показывающие резкое увеличение потоков атмосферного азота в XX веке. Автором утверждалось, что в условиях интенсивной стратификации водной толщи в летний период атмосферные выпадения могут дополнительно приносить от 5 до 25% азота, необходимого для новой пер-

вичной продукции. В 2017 г. этим же автором [Jickells, et al., 2017] утверждалось, что атмосферное выпадение является основным механизмом, поставляющим азот из континентальных источников в открытый океан. По оценкам, представленным в этой работе, в настоящее время антропогенное поступление азота приводит к увеличению общего объема поглощения углерода в океане приблизительно на 0,4% (или $0,15 \cdot 10^{12}$ кг C/год).

По данным таких авторов, как [Gruber, Galloway, 2008; Fowler et al., 2013; Suntharalingam et al., 2012], приблизительное поступление азота с атмосферными осадками может составлять $1,6 \cdot 10^{11}$ кг N/год и может увеличиваться в будущем с ростом технического прогресса.

В работе [Richon et al., 2017] авторы делают вывод о том, что атмосферное поступление является одним из основных источников азота и фосфора в некоторых районах Средиземного моря. Более чем $18 \cdot 10^9$ г N/мес поступает на поверхность Средиземного моря. Это приводит к росту величины первичной продукции в среднем на 30–50%. Утверждается, что эффект поступления фосфатов на поверхность моря в период летней стратификации также может способствовать росту величины первичной продукции в среднем на 6–10%, но иногда достигать и 30%.

Силикаты являются важным биогенным элементом для первичной продукции диатомовых водорослей. Большая часть кремния поступает в морскую среду из континентальных источников, как из поверхностных, так и из грунтовых вод [Sospedra et al., 2017]. Согласно [Frings et al., 2016], атмосферное поступление кремния составляет около 3% от общего поступления его в океан.

Несмотря на относительно продолжительный период исследований, вопрос о количественной оценке, определяющих факторах и соотношении поступающих из атмосферы биогенных элементов остается до конца не изученным.

Организация системы мониторинга

Для определения содержания неорганических форм азота, фосфора и кремния в атмосферных осадках был организован отбор проб в двух районах Крымского побережья (рис. 4.2.1). Осадки отбирались в г. Севастополе на Павловском мысе (Морская гидрометеорологическая станция) и на Черноморском гидрофизическом полигоне (п. Кацивели, Южный берег Крыма). При отборе проб также фиксировались метеопараметры, при которых выпадали осадки.

Станция в пос. Кацивели рассматривалась в качестве фоновой. Поселок относится к району, в котором отсутствуют промышленные и сельскохозяйственные источники загрязнения, точка удалена от автомобильной дороги, влияние промышленных районов с севера ограничено Крымскими горами. Район г. Севастополя является урбанизированным – действуют антропогенные источники поступления азота: транспорт, флот, выбросы котельных при сжигании топлива.

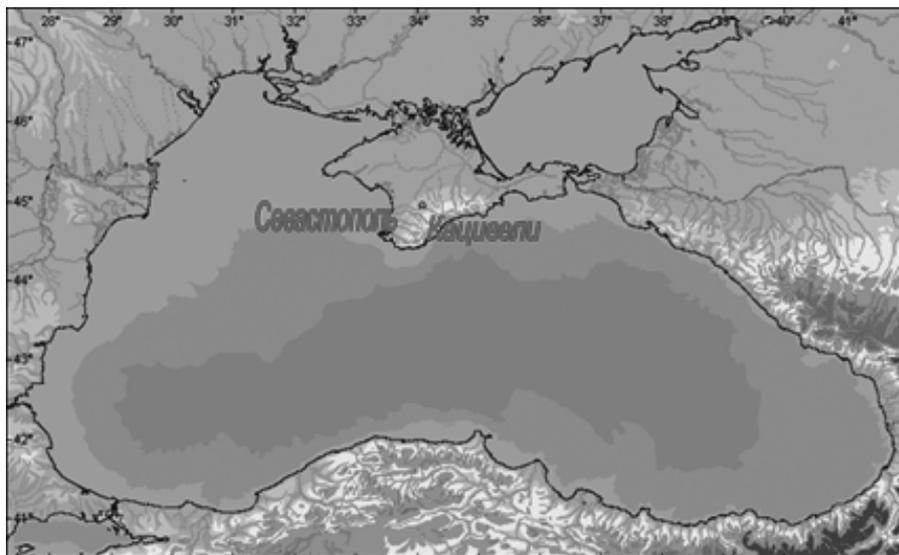


Рис. 4.2.1. Пункты мониторинга содержания неорганического азота, фосфора и кремния в атмосферных осадках.

Исследования атмосферных осадков в Севастополе проводятся на метеостанции, оборудованной в соответствии с требованиями ЕМЕР и работающей круглосуточно, что обуславливает более точный отбор проб осадков за каждый случай их выпадения.

Отбор и обработка проб атмосферных осадков на содержание в них неорганических форм азота проводились согласно руководящему документу [Руководство..., 1991]. Полиэтиленовые банки (флаконы), предназначенные для отбора и хранения проб, доставлялись на станцию из химической лаборатории тщательно промытыми, закрытыми и пронумерованными. Они открывались только на время отбора проб осадков. По окончании дождя осадки переливали в подготовленные полиэтиленовые банки и доставляли в химическую лабораторию. При невозможности быстрой доставки пробы хранили в холодильнике в течение суток. Пробы атмосферных осадков в пос. Кацивели отбирались после каждого случая выпадения дождя или снега и замораживались непосредственно после отбора, поэтому биохимическое окисление практически исключено. Не обрабатывались осадки, количество которых не позволяло провести химический анализ. С 2015 г. на метеоплощадке в г. Севастополе и в пос. Кацивели для оценки влияния сухих выпадений на общий уровень загрязнения осадков проводится отбор проб в два типа осадкосборника – закрытый (открывающийся только в момент выпадения осадков) и постоянно открытый осадкосборник.

Для оценки влияния атмосферных осадков на эволюцию распределения неорганического азота в поверхностном слое вод Черного моря были восстановлены поля среднего содержания аммонийного и нитратного азота, а также общего неорганического азота в верхнем деятельном слое моря в холодный (ноябрь–март) и теплый (апрель–сентябрь) периоды года. Для этого были использованы данные из Банка океанографических данных Морского гидрофизического института (г. Севастополь), полученные в экспедиционных исследованиях 1990–2000 гг.

Для оценки влияния атмосферных выпадений на изменение концентрации хлорофилла «а» рассматривались случаи, когда видимость атмосферы позволяла получить спутниковые данные о распределении содержания хлорофилла «а» в Черном море. В работе использовались данные спутникового мониторинга, взятые с сайта <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>.

Результаты и обсуждения

Всего было отобрано и проанализировано 1100 проб атмосферных осадков на содержание в них неорганического азота, неорганического фосфора и кремния. Из них 61% были отобраны в холодное время года, 39% – в теплое. Статистическая обработка данных показала логнормальное распределение концентраций рассматриваемых элементов в атмосферных осадках.

Атмосферные осадки Крымского побережья характеризовались повышенными концентрациями биогенных элементов. Содержание нитритов изменялось в диапазоне 0,19–6,95 мкмоль/дм³, аммония – 11,47–166,26 мкмоль/дм³, нитратов – 25,77–302,63 мкмоль/дм³, фосфатов – 0,19–4,66 мкмоль/дм³. В 7 случаях концентрации нитритного азота превышали величину ПДК для вод рыбохозяйственного назначения. Содержание фосфатов в одном случае приближалось к значению ПДК для мезотрофных водоемов, к которым относится Черное море [Приказ, 2010], однако не превосходило его. Средневзвешенные концентрации биогенных веществ в пробах атмосферных осадков в г. Севастополе для закрытого и открытого осадкосборников представлены в табл. 4.2.1.

Поток неорганического азота с атмосферными осадками, отобранными в постоянно открытый осадкосборник, превышал поток с осадками, отобранными только во время дождя, на 20%, в то время как такое же отношение для фосфора и кремния составило 3,6 и 2,4 раза соответственно. Это объясняется тем, что в отличие от азота, который находится в атмосфере преимущественно в газообразном состоянии, фосфор и кремний находятся в виде твердых частиц.

Годовые потоки кремния в суммарных выпадениях г. Севастополя и пос. Качи-вели были практически одинаковыми.

Неорганический азот. Основными формами азота, поступавшими с атмосферными осадками во всех пунктах наблюдения, являлись аммоний и нитраты, вклад нитритов не превышал 2% (рис. 4.2.2).

Таблица 4.2.1
Средневзвешенные концентрации биогенных веществ
в пробах атмосферных осадков

Год	Средневзвеш. N _{неорг}		Средневзвеш. SiO ₃ ²⁻		Средневзвеш. PO ₄ ³⁻		% сухих выпадений N / SiO ₃ ²⁻ / PO ₄ ³⁻
	закр.	откр.	закр.	откр.	закр.	откр.	
2015	73,11	86,31	0,60	1,06	0,42	1,12	18 / 77 / 167
2016	92,58	96,98	0,78	1,37	0,49	1,09	5 / 75 / 122
2017	78,55	91,93	1,76	2,93	0,51	1,32	17 / 66 / 159

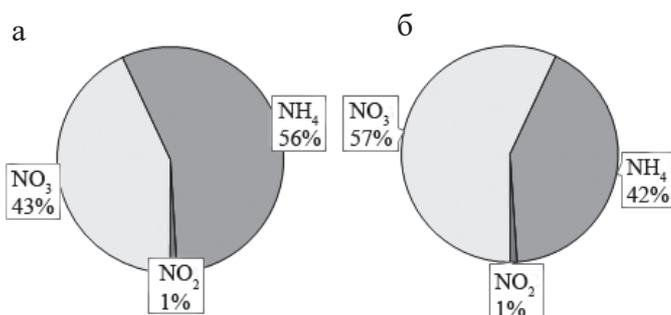


Рис. 4.2.2. Относительный вклад неорганических форм азота в пробах атмосферных осадков: а – в пос. Кацивели, б – в г. Севастополе.

Эти результаты хорошо соответствуют имеющимся данным о соотношении форм азота в пробах атмосферных осадков [Herut et al., 1999; Баранов, Янченко, 2010; Свистов, Полищук, 2014]. На фоновой станции в пос. Кацивели процентное соотношение аммония и нитратов в атмосферных осадках составило 56:43 (см. рис. 4.2.2а), в то время как в урбанизированном районе – г. Севастополь – оно было обратным – 42:57 (см. рис. 4.2.2б). Преобладание нитратов в пробах г. Севастополя может указывать на антропогенное поступление элемента, связанное с повышенными выбросами от антропогенных источников.

В предыдущих работах [Varenik et al., 2015] нами было определено, что рост содержания неорганического азота в атмосферных осадках происходил в холодное время года (рис. 4.2.3а). Это объяснялось работой котельных города с октября по апрель. Однако при анализе внутригодового распределения в 2015–2016 гг. выяснилось, что статистически значимого сезонного хода содержания неорганического азота не наблюдается (рис. 4.2.3б).

Можно предположить, что такая картина внутригодового хода средневзвешенных концентраций может определяться существенным изменением количества

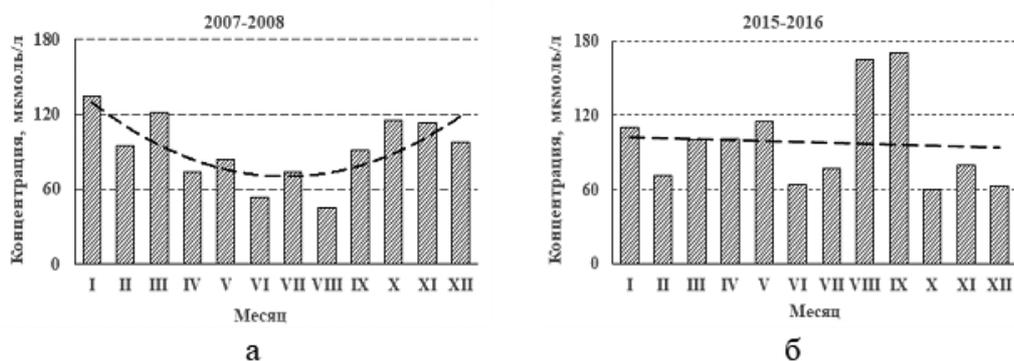


Рис. 4.2.3. Внутригодовое распределение средневзвешенных концентраций неорганического азота в атмосферных осадках г. Севастополя: а – в 2007–2008 гг., б – в 2015–2016 гг.

антропогенных источников выбросов неорганических форм азота в атмосферный воздух по сравнению с периодом до 2014 г., а именно – увеличением количества морского, авиационного, и в первую очередь наземного транспорта, а также уменьшением количества сжигаемого угля и мазута.

Неорганический фосфор. Согласно [Herut et al., 1999], интенсивное поступление антропогенного азота в морскую экосистему может привести к тому, что некоторые морские районы перейдут в разряд лимитированных по фосфору.

Поток фосфатов и кремния с атмосферными выпадениями в исследуемый период был существенно ниже потока неорганического азота (рис. 4.2.4).

Поток неорганического фосфора (см. рис. 4.2.4) с влажными выпадениями в 2012 г. был минимальным, но такой результат можно объяснить тем, что количество проб на содержание фосфора за этот год было существенно меньше, чем в остальные. При этом отсутствуют данные за летние месяцы, когда содержание фосфора увеличивается за счет роста продуктов метаболизма и пылицы в атмосфере.

Средняя концентрация неорганического фосфора в атмосферных осадках составила 0,55 мкмоль/л. Внутригодовое изменение концентрации неорганического фосфора характеризовалось увеличением его содержания в летний период, что обычно объясняется поступлением фосфора с продуктами метаболизма растений. Кроме того, такое внутригодовое распределение может быть объяснено особенностями миграции фосфора в биосфере, связанной, в том числе, с поступлением минеральных форм элемента с пылевыми частицами, образующимися при эрозии почвы и горных пород.

Кремний. Минимальное содержание кремния в атмосферных осадках наблюдалось в 2013 г. (среднегодовое значение 0,71 мкмоль/л), максимальное – в 2012 г. (среднегодовое значение 3,93 мкмоль/л). Средняя величина за период 2010–2015 гг. составила 2,14 мкмоль/л.

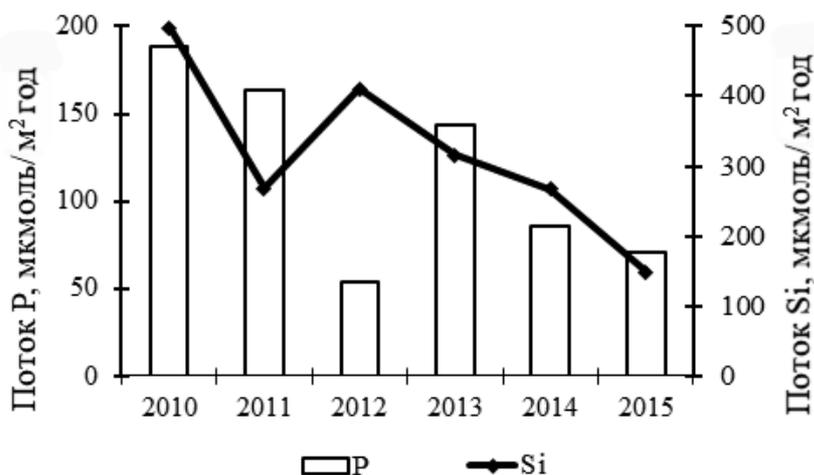


Рис. 4.2.4. Поток неорганического фосфора и кремния с атмосферными выпадениями в 2010–2015 гг.

Для кремния также характерно некоторое увеличение средневзвешенной концентрации в период с апреля по август, что может быть связано с уменьшением количества случаев выпадения осадков и, как следствие, — с накоплением в атмосфере терригенного кремния в виде аэрозолей.

Поток кремния был наибольшим в 2010 г. и в последующие годы постепенно снижался (см. рис. 4.2.4).

Оценка роли атмосферных осадков в пространственно-временном изменении распределения неорганического азота в поверхностном слое вод Черного моря. Распределение потока азота с атмосферными осадками по морю в целом зависит от распределения количества осадков, выпавших на акваторию моря, поскольку основной вклад (68%) в изменение концентрации соединений азота в осадках вносит количество осадков, и поступление соединений азота определяется произведением их концентрации на количество осадков [Чайкина, 2007]. Согласно [Гидрометеорология..., 1991], характер пространственного изменения осадков над морем определяется процессами атмосферной циркуляции и особенностями орографии подстилающей поверхности. Из-за того, что воздушные массы встречают горы Кавказа, расположенные непосредственно у моря, именно в юго-восточных и восточных районах моря выпадает максимальное количество осадков в течение всего года. На полученных картах поступления азота с атмосферными осадками можно видеть, что в юго-восточной части моря в районе городов Туапсе и Батуми, а также в южной части вдоль побережья Турции поток азота из атмосферы максимален. В северо-западной части моря поступление азота с атмосферными осадками меньше.

За пятилетний период исследования, включающий данные с 2004 по 2008 гг., суммарное фоновое поступление суммы неорганических соединений азота на поверхность Черного моря составило около $275 \cdot 10^3$ моль/км² (рис. 4.2.5).

Средний годовой фоновый поток соединений азота на поверхность Черного моря составил порядка 0,65 т/(км²·год), или $46,5 \cdot 10^3$ моль/(км²·год).

При выпадении атмосферных осадков распространение неорганического азота на глубину происходит постепенно. Поэтому можно ожидать, что влияние атмосферных осадков на содержание неорганического азота в море будет более существенным для верхнего слоя. При этом относительная значимость этого влияния будет увеличиваться от прибрежных районов к открытому морю, поскольку средние величины содержания неорганических соединений азота в поверхностных водах уменьшаются от прибрежных к открытым районам моря.

Основные особенности распределения неорганического азота в поверхностном слое моря состоят в том, что их содержание в северо-западной части, подверженной влиянию берегового стока, велико как в холодное, так и в теплое время года за счет поступления с реками. В открытых районах моря концентрация неорганического азота значительно меньше, чем в прибрежных и приустьевых районах. При этом в холодный период года содержание неорганических соединений азота в этой части моря превышает содержание в теплый период за счет поступления поверхностных вод с повышенным содержанием неорганического азота из Азовского моря, более интенсивным, по сравнению с летним периодом, физическим обменом с водами основного пикноклина, в которых повышено содержание нитратов и аммония.

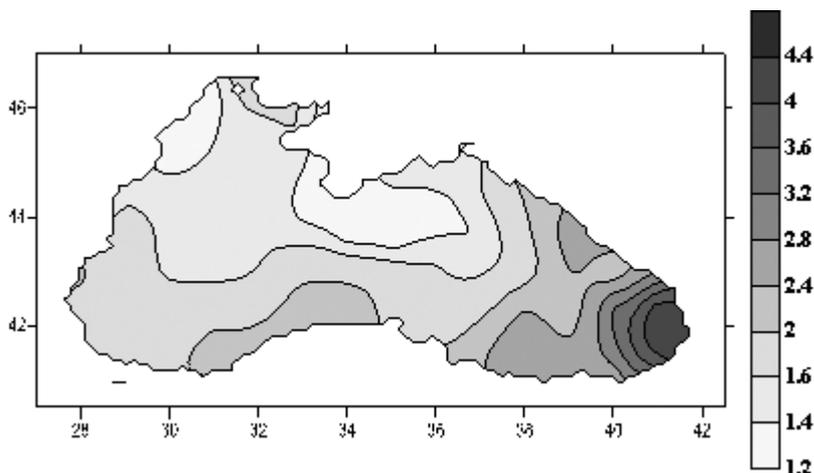


Рис. 4.2.5. Фоновый поток азота с атмосферными осадками (т/км²·год) на поверхность Черного моря за период 2004–2008 гг.

На рис. 4.2.6 показано поле среднего содержания неорганических соединений азота в верхнем слое моря в теплый (апрель–сентябрь) период года, поступление неорганических соединений азота с атмосферными осадками, выпавшими на поверхность Черного моря 6 июня 2004 г., и величина отношения поступления к среднему содержанию в верхнем деятельном слое. Сплошным овалом на рисунках выделены районы существенного влияния атмосферных осадков на распределение неорганических соединений азота в теплый период года, пунктирной линией – незначительного влияния атмосферных осадков.

На рис. 4.2.6 видно, что на северо-западном и западном шельфе моря, где содержание неорганического азота достаточно велико за счет берегового стока биогенных элементов, влияние атмосферного поступления незначительно (отношение поступления азота с осадками к среднему содержанию азота в море не превышает 1,5%).

В центральной части Черного моря, при меньшем среднем содержании неорганического азота и достаточно высокой концентрации азота в осадках, вклад по-

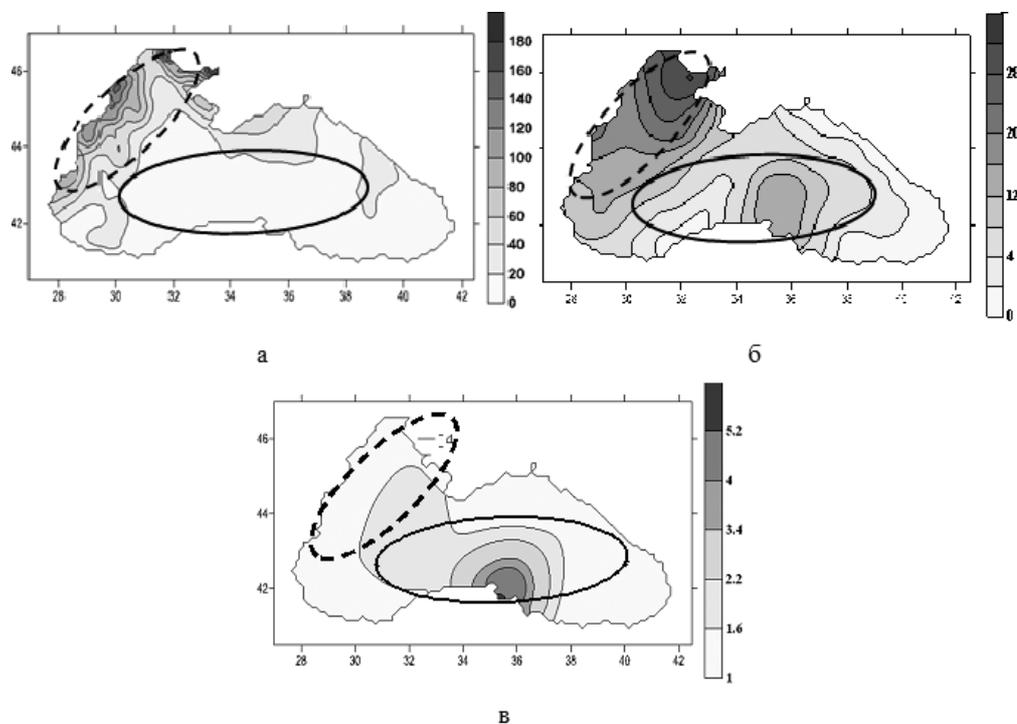


Рис. 4.2.6. Среднее содержание неорганических соединений азота в верхнем слое моря в теплый (апрель–сентябрь) период года (а), поступление неорганических соединений азота с атмосферными осадками, выпавшими на поверхность Черного моря 6 июня 2004 г. (б), величина отношения поступления к среднему содержанию в верхнем деятельном слое (в).

ступления азота с атмосферными осадками существенно выше и достигает 15%. Это является ярким примером того, что в летний период, когда содержание неорганических соединений азота в поверхностном слое вод центральной части моря достигает наименьших значений, атмосферные выпадения становятся одним из основных источников этого биогенного элемента. По мере приближения к берегу, где сохраняется, а в некоторых районах даже увеличивается с наступлением летнего периода интенсивность береговых источников биогенных элементов, роль атмосферного источника азота постепенно уменьшается.

На рис. 4.2.7 показано поле среднего содержания общего неорганического азота в фотическом слое моря в холодный (ноябрь–март) период года, поле неорганического азота, выпавшего на поверхность Черного моря с атмосферными осадками 29 января 2007 г., а также поле отношения поступления азота с осадками к его среднему содержанию в море. Сплошным овалом на рисунке показаны области значительного влияния атмосферных осадков на изменение содержания неорганического азота в верхнем слое моря.

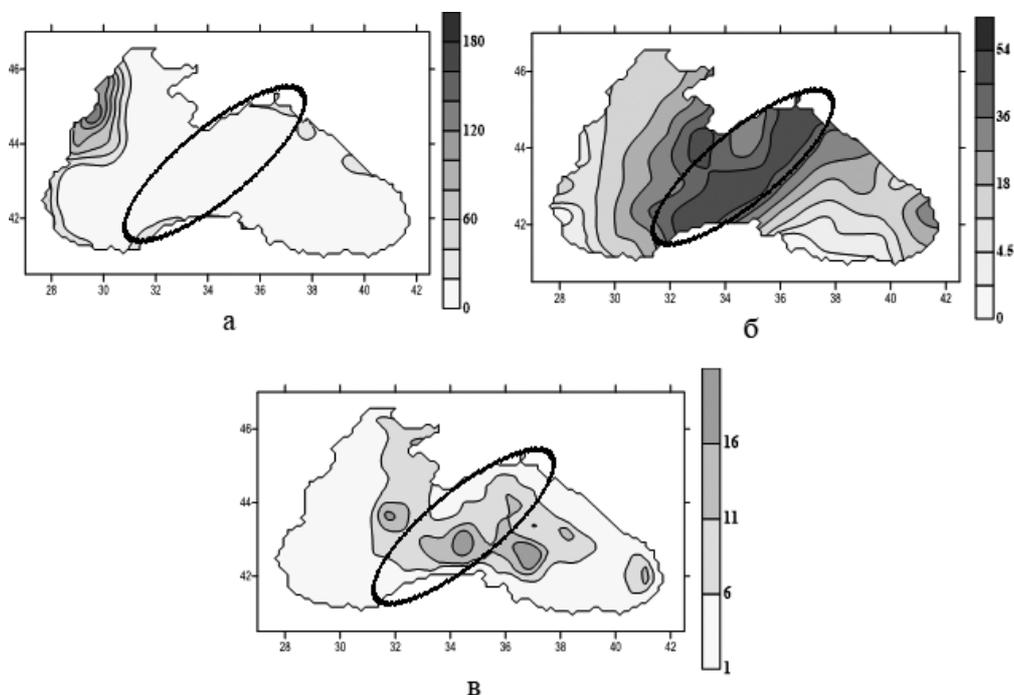


Рис. 4.2.7. Среднее содержание общего неорганического азота в фотическом слое моря в холодный (ноябрь–март) период года (а), поле неорганического азота, выпавшего на поверхность Черного моря с атмосферными осадками 29 января 2007 г. (б), поле отношения поступления азота с осадками к его среднему содержанию в море (в).

В холодный период года (см. рис. 4.2.7), так же как и в теплый период (см. рис. 4.2.6), влияние поступления неорганического азота с атмосферными осадками проявляется слабо в тех районах, где существенную роль в бюджете неорганического азота играют другие источники этого элемента. К таким источникам относится береговой сток на северо-западном и западном шельфе Черного моря, поступление поверхностных вод с повышенным содержанием неорганического азота из Азовского моря, более интенсивный по сравнению с летним периодом физический обмен с водами основного пикноклина, в которых повышено содержание нитратов и аммония.

Из данных, представленных на рис. 4.2.6 и 4.2.7, можно сделать вывод о том, что вклад атмосферных осадков как источника поступления неорганического азота в поверхностный слой моря в холодный период года несколько меньше, чем в теплый. При этом в прибрежной и шельфовой частях моря, где концентрации неорганического азота достаточно высоки за счет поступления из береговых источников, вклад атмосферных осадков незначителен и составляет около 1,5%.

Влияние на уровень первичной продукции. Неорганические соединения азота являются именно теми формами азота, которые в значительной степени определяют величину первичной продукции, т.е. скорость фотосинтетического образования органического вещества в Черном море. Одним из показателей интенсивности первично-продукционных процессов является концентрация хлорофилла «а». Учитывая, что информация о содержании хлорофилла «а» является стандартной при дистанционном зондировании [Мониторинг..., эл. ресурс], возможно проследить эволюцию полей хлорофилла «а» в связи с поступлением неорганических соединений азота с атмосферными выпадениями в различных районах Черного моря и в различные сезоны года.

Общие представления о возможном влиянии поступления неорганических соединений азота с атмосферными выпадениями на эволюцию полей хлорофилла «а» сводятся к тому, что дополнительное поступление азота должно приводить в течение нескольких дней к локальному увеличению концентрации хлорофилла «а» в районе выпадения атмосферных осадков, а затем к постепенному уменьшению интенсивности этого явления в результате удаления азота в виде органического вещества из фотического слоя и рассеивания в результате физических процессов водообмена.

Основной проблемой при анализе эволюции полей хлорофилла «а» является то, что его концентрация может увеличиваться как в результате поступления дополнительного количества неорганических соединений азота с атмосферными осадками, так и в результате их поступления в поверхностный слой вод вследствие апвеллинга и вовлечения более глубоких слоев вод. По этой причине анализ эволюции полей хлорофилла «а» должен выполняться совместно с анализом эволюции полей поверхностной температуры, которая в теплый период года является индикатором процессов апвеллинга и вовлечения.

На фиг. 4.2.1 (вклейка) представлены данные о распределении средней за 8 дней концентрации хлорофилла «а», температуры на поверхности Черного моря в этот же период, а также выпадении атмосферных осадков 31 мая 2004 г. Прямоугольником на картах выделена центральная часть Черного моря, где изменения концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое после выпадения осадков наиболее велики.

Из представленных данных можно видеть, что в летние месяцы концентрация хлорофилла «а» в центральной части моря составляет порядка $0,4 \text{ мг/м}^3$ (см. фиг. 4.2.1а). После выпадения атмосферных осадков 31 мая 2004 г. на поверхность моря поступает неорганический азот (см. фиг. 4.2.1б), который может использоваться фитопланктоном в первично-продукционных процессах. Концентрация хлорофилла «а» в этой части моря через несколько дней после выпадения осадков возрастает (см. фиг. 4.2.1в). Таким образом, поступление неорганических соединений азота с атмосферными осадками в данном случае привело к увеличению интенсивности первично-продукционных процессов.

Затем неорганический азот постепенно удаляется из фотической зоны в результате осаждения взвешенного органического вещества или переносится общей системой течений. Концентрация хлорофилла «а» постепенно возвращается к исходным значениям, определяемым содержанием биогенных элементов в поверхностном слое моря (см. фиг. 4.2.1г).

Положительный ход температуры при ожидаемом прогреве моря в летние месяцы свидетельствовал бы о том, что явления вовлечения не наблюдалось, и эффект увеличения концентрации хлорофилла определяется влиянием атмосферных осадков. Как видно из представленных рисунков, температура поверхностного слоя моря до и после выпадения осадков повышалась, что указывает на отсутствие активных процессов апвеллинга и вовлечения холодных глубинных вод, богатых биогенными элементами. Таким образом, именно выпадение интенсивных атмосферных осадков привело к увеличению концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое в районах выпадения осадков. Для района северо-западного шельфа Черного моря какие-либо изменения в распределении хлорофилла «а» практически не наблюдались, поскольку гораздо большее количество неорганического азота поступало в этот район моря с речным стоком. Этот факт еще раз подтверждает вывод о том, что атмосферные осадки как источник поступления неорганического азота являются более значимыми именно для центральной части моря.

На рис. 4.2.8 представлено обобщение влияния поступления неорганических соединений азота с атмосферными осадками на эволюцию поля хлорофилла «а». Для построения графика использовались величины изменения содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое моря после выпадения атмосферных осадков различной интенсивности, взятые со спутниковых снимков с сайта <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>.

Как видно из графика, рост концентрации хлорофилла «а» пропорционален количеству выпавшего азота. При выпадении неорганических соединений азота с

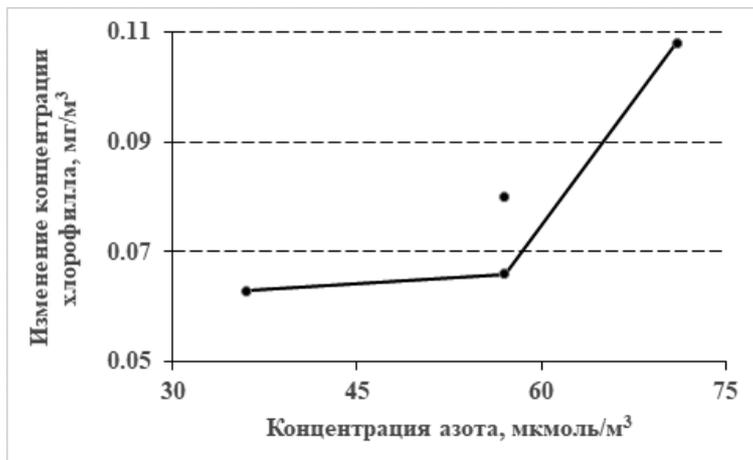


Рис. 4.2.8. Изменение концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое моря в зависимости от количества неорганического азота, выпавшего с атмосферными осадками.

атмосферными осадками в количестве 36 мкм/м³ концентрация хлорофилла «а» в поверхностном слое моря увеличилась на 0,063 мг/м³. Изменение концентрации хлорофилла при выпадении более интенсивных осадков составило 0,066 мг/м³ и 0,108 мг/м³ при поступлении азота в количестве 57 мкм/м³ и 71 мкм/м³ соответственно. При этом в случае апвеллинга, зафиксированного по данным об изменении температуры моря, концентрация хлорофилла «а» в поверхностном слое возросла на 0,08 мг/м³ от первоначального значения, что подтверждает тот факт, что данное явление также является важным фактором, контролирующим изменение концентрации хлорофилла в море.

Для анализа влияния соотношения биогенных элементов в атмосферных выпадениях на водные экосистемы также можно воспользоваться соотношением Редфилда азота к фосфору или усовершенствованным соотношением [Brzezinski, 1985] N:P:Si, которое составляет 16:1:15. В атмосферных осадках соотношение биогенных элементов значительно отличалось от классического соотношения (табл. 4.2.2).

В работе [Burlakova et al., 2003] сообщается об увеличении первичной продукции на 25% в результате атмосферного поступления азота. По данным [De Leeuw et al., 2003], при среднем поступлении азота с осадками 0,8 мМ N/м²·день рост первичной продукции составляет около 5,3 мМ C/м²·день.

Принимая соотношение Редфилда C:N (106:16), мы получили, что среднее годовое поступление неорганического азота с атмосферными осадками 30,4 мМ/м² должно приводить к дополнительной величине первичной продукции 201,4 мМ/м². Учитывая данные [Demidov, 2008] о том, что среднее значение годовой первичной

Таблица 4.2.2
Соотношение Редфилда в атмосферных осадках

Год	N:P:Si
2015	174 : 1 : 1.5
2016	189 : 1 : 1.6
2017	154 : 1 : 3.5

продукции составляет 100–130 г С/м² ($8,3 \cdot 10^3$ – $10,8 \cdot 10^3$ мМ С/м²) в прибрежных районах и 120–170 г С/м² ($10 \cdot 10^3$ – $14,2 \cdot 10^3$ мМ С/м²) в глубоководной области, мы определили, что поток азота с атмосферными выпадениями может приводить к увеличению первичной продукции на 1,4–2,4%.

Годовое поступление растворенного неорганического фосфора с атмосферными выпадениями (118 мкМ/м²) дает увеличение первичной продукции на 0,08–0,14% от ее среднемноголетнего значения для открытых и прибрежных районов Черного моря. Без учета регенерационной продукции, среднее значение которой равно 64% от общей первичной [Пархоменко, 2005], вклад атмосферного неорганического фосфора в образование первичной продукции составляет 0,5%.

В работе [Brzezinski, 1985] утверждается, что соотношение C:Si для диатомовых составляет 8:1. Исходя из этого получено, что дополнительный вклад атмосферного поступления неорганического кремния в образование первичной продукции составляет 0,02% от ее годового значения в открытой части Черного моря.

Заключение

В результате организованного мониторинга по оценке содержания биогенных элементов (неорганического азота, фосфора и кремния) в атмосферных осадках получены многолетние данные о поступлении этих биогенных элементов на поверхность Черного моря. Изучена сезонная и межгодовая изменчивость поступления биогенных элементов, влияние этого поступления на биогеохимические характеристики поверхностного слоя Черного моря.

Показано, что основными формами азота, поступавшего с атмосферными осадками, являлись аммоний и нитраты. При этом преобладание нитратов в пробах урбанизированного района отбора проб (г. Севастополя) может указывать на антропогенное поступление элемента, связанное с повышенными выбросами от антропогенных источников.

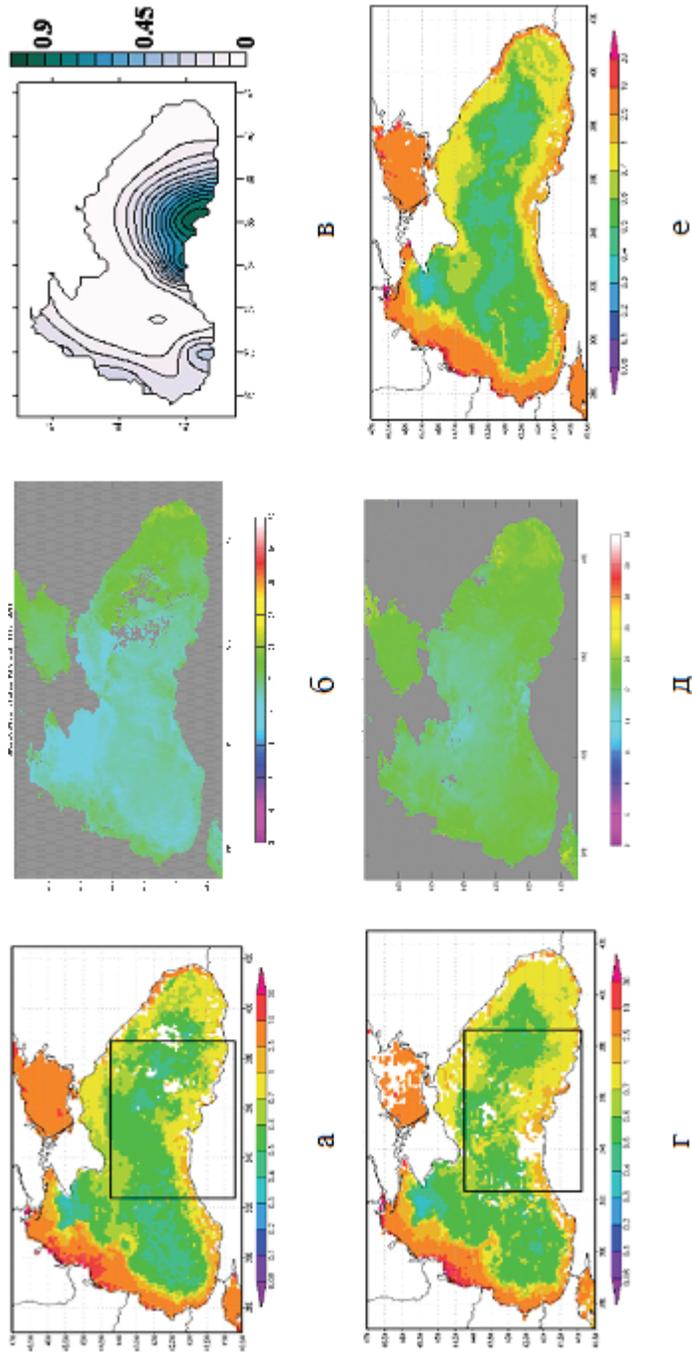
Во внутригодовом изменении по сравнению с предыдущим периодом исследования не наблюдается четкого сезонного хода, что может быть связано с измене-

нием количества антропогенных источников поступления неорганического азота в атмосферный воздух после 2014 г.

Средний годовой фоновый поток соединений азота на поверхность Черного моря составил порядка $46,5 \cdot 10^3$ моль/км²·год. На северо-западном и западном шельфе, где содержание неорганического азота достаточно велико за счет берегового стока биогенных элементов, влияние атмосферного поступления незначительно. Однако в центральной части моря, при меньшем среднем содержании неорганического азота и достаточно высокой концентрации азота в осадках, вклад поступления азота с атмосферными осадками существенно выше и достигает 15%.

На синоптическом масштабе поступление неорганических соединений азота с атмосферными осадками может приводить к существенному увеличению концентрации хлорофилла «а» в районе выпадения атмосферных осадков. При этом рост концентрации хлорофилла «а» пропорционален величине поступления неорганического азота и может быть сопоставим с изменением содержания хлорофилла «а» в результате действия такого процесса, как вовлечение глубинных слоев моря, обогащенных биогенными элементами.

Несмотря на то, что поток неорганического фосфора и кремния с атмосферными осадками на поверхность Черного моря существенно ниже потока неорганического азота, они также являются элементами, влияющими на биогеохимические характеристики поверхностного слоя. Соотношение Редфилда в атмосферных осадках существенно отличалось от классического соотношения для морских вод, что позволяет сделать вывод о возможном влиянии атмосферных осадков на изменение соотношения биогенных элементов в верхнем деятельном слое Черного моря.



Фиг. 4.2.1. Изменение концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое Черного моря после выпадения атмосферных осадков в мае-июне 2004 г.: а – концентрация хлорофилла «а» 24–31 мая 2004 г.; б – температура поверхности моря 24–31 мая 2004 г.; в – поступление неорганического азота с атмосферными осадками 31 мая 2004 г.; г – изменение концентрации хлорофилла «а» 1–8 июня 2004 г.; д – температура поверхности моря 1–8 июня 2004 г.; е – концентрация хлорофилла «а» через две недели после выпадения осадков.