

Н.С.Геворгиз*, О.В.Кривенко**, С.И.Кондратьев*

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

***Институт биологии южных морей НАН Украины, г.Севастополь*

**ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ МНОГОЛЕТНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
СОДЕРЖАНИЯ ОСНОВНЫХ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ
ЗА ПЕРИОД 1980 – 2002 гг.**

Создана регулярная сетка данных (с разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$) по пространственному распределению среднесезонных значений концентраций основных биогенных элементов в северо-западной части Черного моря. По содержанию неорганических соединений азота, фосфора и кремния выделено три области, соответствующие основным зонам трансформации речных вод. Полученные результаты согласуются с существующими представлениями о формировании гидрохимического режима и биологической продуктивности вод северо-западной части Черного моря и созданный массив данных корректен для целей математического моделирования.

Эвтрофикация вод северо-западной части (СЗЧ) Черного моря является одной из важнейших экологических проблем, так как может привести к нарушению функционирования экосистемы не только данной акватории, но и моря в целом [1]. Содержание основных биогенных элементов является важнейшим показателем экологического состояния вод, который непосредственно влияет на формирование первичной продукции в море [2, 3].

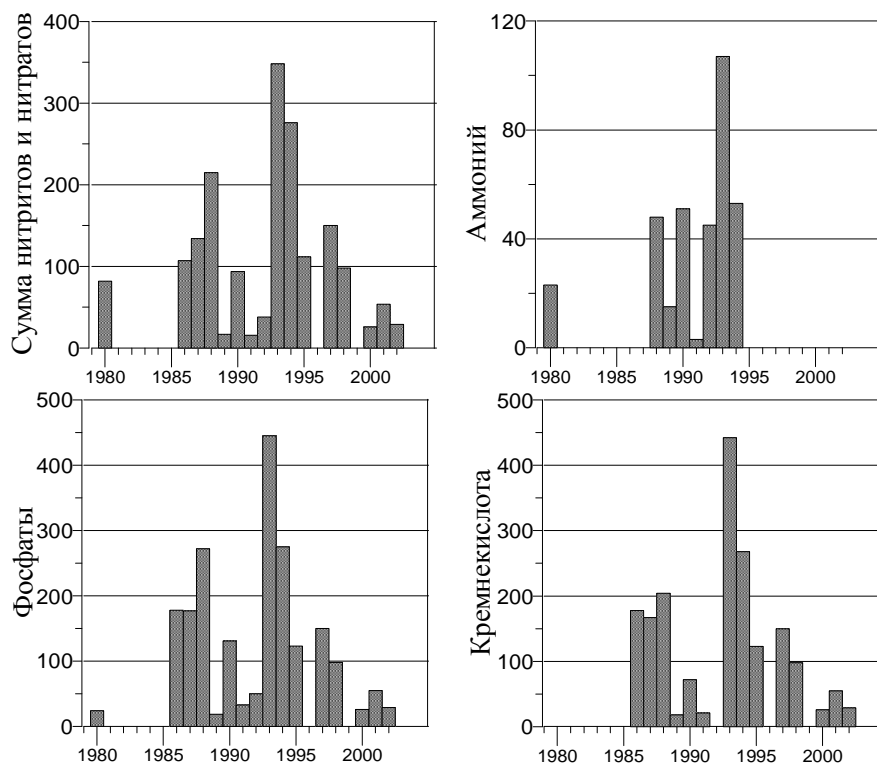
Одним из важнейших инструментов изучения процессов функционирования экосистемы Черного моря является математическое моделирование [4]. Основой для него служат данные натурных наблюдений. Для включения в математическую модель материал должен иметь вид регулярной сетки, разрешение которой соответствует степени неоднородности данных. Исходя из этого, выбор масштабов осреднения приобретает особое значение. В ряде работ при анализе распределения физических [5, 6], химических [7] и биологических [8] показателей в Черном море в качестве базового масштаба осреднения по пространству использовалась $1^\circ \times 1^\circ$ сетка. Однако СЗЧ характеризуется высокой степенью неоднородности физических [9], химических [7, 10] и биологических полей [8, 11] по сравнению с морем в целом. В этих условиях для того, чтобы добиться однородности данных в пределах ячейки осреднения, необходимо выбрать минимальный масштаб осреднения, ограниченный обеспеченностью данными наблюдений. Использованный нами массив информации и распределение данных по пространству позволил уменьшить масштаб осреднения до $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ квадратов.

Цель настоящей работы – создать регулярную сетку данных пространственного распределения среднесезонных значений концентраций основных биогенных элементов в СЗЧ и оценить ее достоверность, исходя из общих представлений о механизмах формирования химических и биологических полей в этом районе моря.

Обеспеченность данными наблюдений. Были проанализированы материалы по содержанию нитратов, нитритов, аммония, фосфатов и кремнекислоты в водах СЗЧ за период 1980 – 2002 гг. (табл.1).

При отборе данных район исследований был ограничен с юга 44° с.ш. и с востока 34° в.д., таким образом, он охватил весь северо-западный шельф Черного моря, прилегающую область свала глубин, а также прибрежные воды Крыма. Наиболее обеспечен данными наблюдений верхний 30 м слой вод. В среднем по морю этот слой соответствует зоне наиболее активного фотосинтеза и содержание минеральных солей в нем непосредственно влияет на продуктивность вод. Поэтому данный слой был выбран для анализа. Общее число определений нитритов в верхнем 30 м слое вод составило 1960, нитратов 1839, аммония 345, фосфатов 2089, кремнекислоты 1851.

Данные были сгруппированы по отдельным годам и месяцам года. На рис.1 показано количество определений концентраций минеральных соединений азота в отдельные годы. С 1980 по 1986 гг. проводились единичные определения содержания нитритов и нитратов. В период с 1986 по 2002 гг. измерения имеются практически для всех лет (от 16 до 413 измерений в год), за исключением 1996 и 1999 гг. Основная часть определений аммония выполнена в период с 1988 по 1994 гг. (от 3 до 107 измерений в год). Обеспеченность данными определений фосфатов и кремнекислоты по годам аналогична приведенной выше для нитритов и нитратов (рис.1). Количество измерений в год варьирует от 4 до 445 для фосфатов и от 18 до 442 для кремнекислоты.



Р и с . 1 . Количество определений отдельных соединений азота, фосфатов и кремнекислоты в различные годы за период 1980 – 2002 гг.

Таблица 1. Характеристика массива данных.

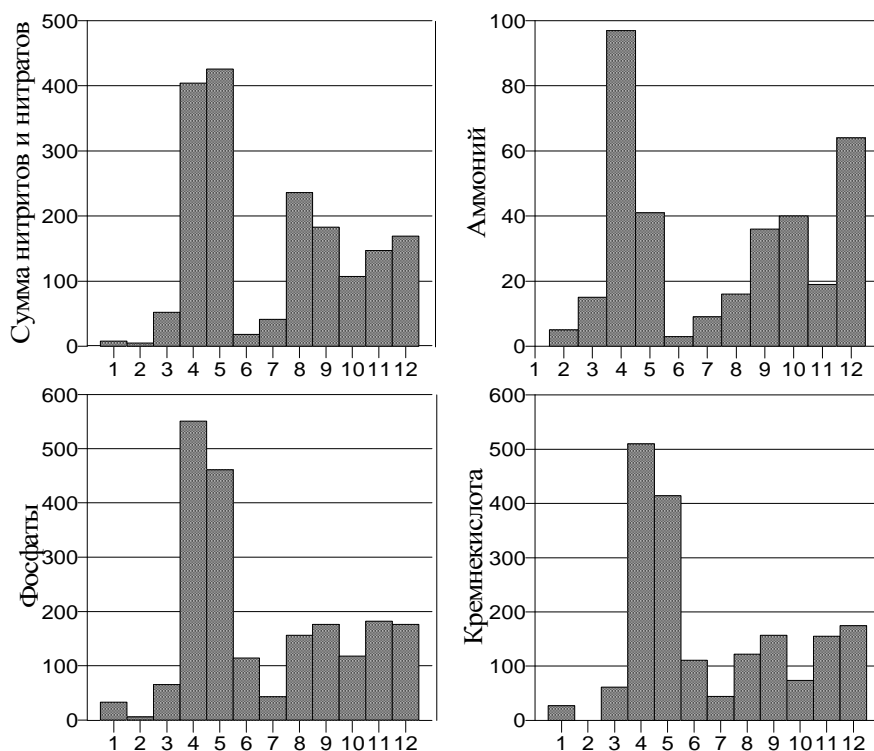
рейс	сроки проведения
7 рейс НИС «Ак.Вернадский»*	17.03 – 07.04.1973
9 рейс НИС «Проф.Водяницкий»**	20.08 – 18.09.1980
данные МО Укр НИГМИ	01 – 15.06.1986; 12 – 24.08.1986; 29.09.1986; 15.01.1987; 15 – 16.05.1987; 27 – 28.05.1987; 12 – 13.06.1987; 01.07.1987; 15.07.1987; 10 – 11.08.1987; 09 – 15.11.1987; 15.01.1988
18 рейс НИС «Проф.Колесников»*	10.04 – 30.05.1988
данные МО Укр НИГМИ	14 – 23.04.1988; 04 – 20.05.1988; 14 – 15.06.1988; 11.07.1988; 02 – 17.08.1988; 01 – 15.09.1988; 01 – 12.11.1988; 15.03.1989
51 рейс НИС «Мих.Ломоносов»*	11.11 – 14.12.1989
данные МО Укр НИГМИ	10.04.1990; 10 – 13.05.1990; 06 – 29.07.1990
32 рейс НИС «Проф.Водяницкий»**	05 – 28.09.1990
53-а рейс НИС «Мих.Ломоносов»*	25.09 – 4.11.1990
данные МО Укр НИГМИ	04.11.1990; 30.11.1990; 02.12.1990; 13.12.1990
33 рейс НИС «Проф.Водяницкий»**	08 – 14.06.1991
данные МО Укр НИГМИ	07 – 28.09.1991
35 рейс НИС «Проф.Водяницкий»**	01 – 15.11.1991
54 рейс НИС «Мих.Ломоносов»*	17.11 – 13.12.1991
36 рейс НИС «Проф.Водяницкий»**	25.01 – 05.02.1992
30 рейс НИС «Проф.Колесников»*	02 – 30.04.1993
41 рейс НИС «Проф.Водяницкий»**	04 – 14.04.1993
НИС «Vilim»*	04.1993
43 рейс НИС «Проф.Водяницкий»**	02 – 04.09.1993
31 рейс НИС «Проф.Колесников»*	16.11.1993 – 14.01.1994
25 рейс НИС «Гидрооптик»*	30.04 – 15.05.1994
32 рейс НИС «Проф.Колесников»*	02 – 27.12.1994
33 рейс НИС «Проф.Колесников»*	16.03 – 06.04.1995
17 рейс НИС «Трепанг»*	13 – 19.09.1997
18 рейс НИС «Трепанг»*	02 – 12.10.1997
НИС «Центавр»***	25.03.1998; 15 – 17.10.1998
НИС «Диорит»***	03 – 07.12.1998
НИС «Горизонт»*	21 – 22.05.2000
НИС «Центавр»***	30.11.2000; 24 – 26.05.2001
НИС «Вихрь»***	19 – 22.11.2001
НИС «Нефтегаз»***	24.01.2002
НИС «Вихрь»***	25.04.2002; 23 – 26.07.2002

Принадлежность данных: * – данные Банка данных МГИ НАН Украины; ** – данные Банка данных отдела экологической физиологии водорослей ИнБЮМ НАН Украины; *** – данные ЮО УкрГГРИ (г.Симферополь).

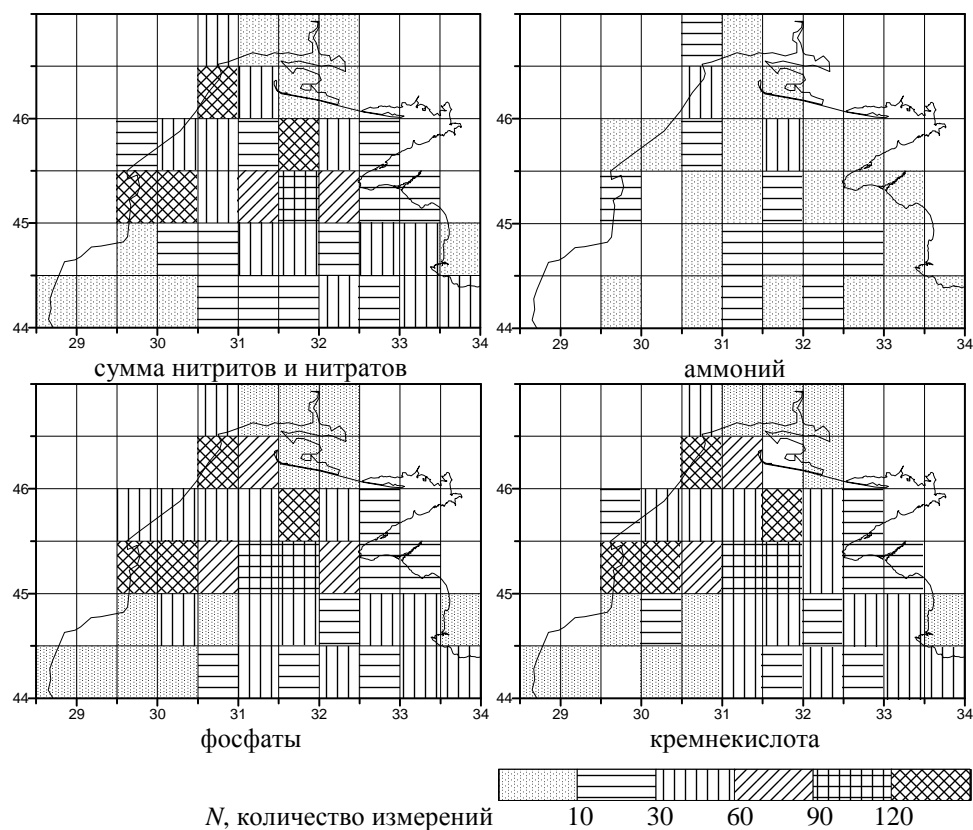
На рис.2 приведено распределение данных определений по месяцам. Наиболее изученным является весенний период. В апреле и мае число определений окисленных соединений азота, фосфатов и кремнекислота достигает 400 – 500, аммония 100 измерений. Достаточно хорошо обеспечен данными наблюдений и период с августа по декабрь. В январе – феврале проводились лишь единичные измерения рассматриваемых параметров.

С целью исследования характера распределения данных измерений по рассматриваемой акватории моря для всех параметров была оценена обеспеченность данными в пределах $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ квадратов простой географической сетки по всему верхнему 30 м слою водной толщи (рис.3) и по слоям 0 – 10; 10 – 20 и 20 – 30 м. Более 60 % определений выполнено в слое 0 – 10 м. Характер распределения количества данных по акватории моря идентичен для всех выделенных слоев водной толщи. Наибольшее число измерений окисленных соединений азота, фосфора и кремния (90 – 230 в квадрате) получено в западной и центральной частях рассматриваемой акватории. Для аммония обеспеченность данными по отдельным квадратам значительно меньше (в среднем 10 – 30), в придунайском районе наблюдения практически отсутствуют.

На основе осреднения имеющихся данных по $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ квадратам и по отдельным 10 м слоям в пределах верхнего наиболее продуктивного слоя моря (30 м) была проанализирована пространственная изменчивость среднесуточных значений концентраций исследуемых соединений, среднеквadraticеских отклонений этих показателей на акватории северо-западного шельфа и прилегающей к ней глубоководной области Черного моря.



Р и с . 2. Количество определений отдельных соединений азота, фосфатов и кремнекислота по месяцам за период 1980 –2002 гг.

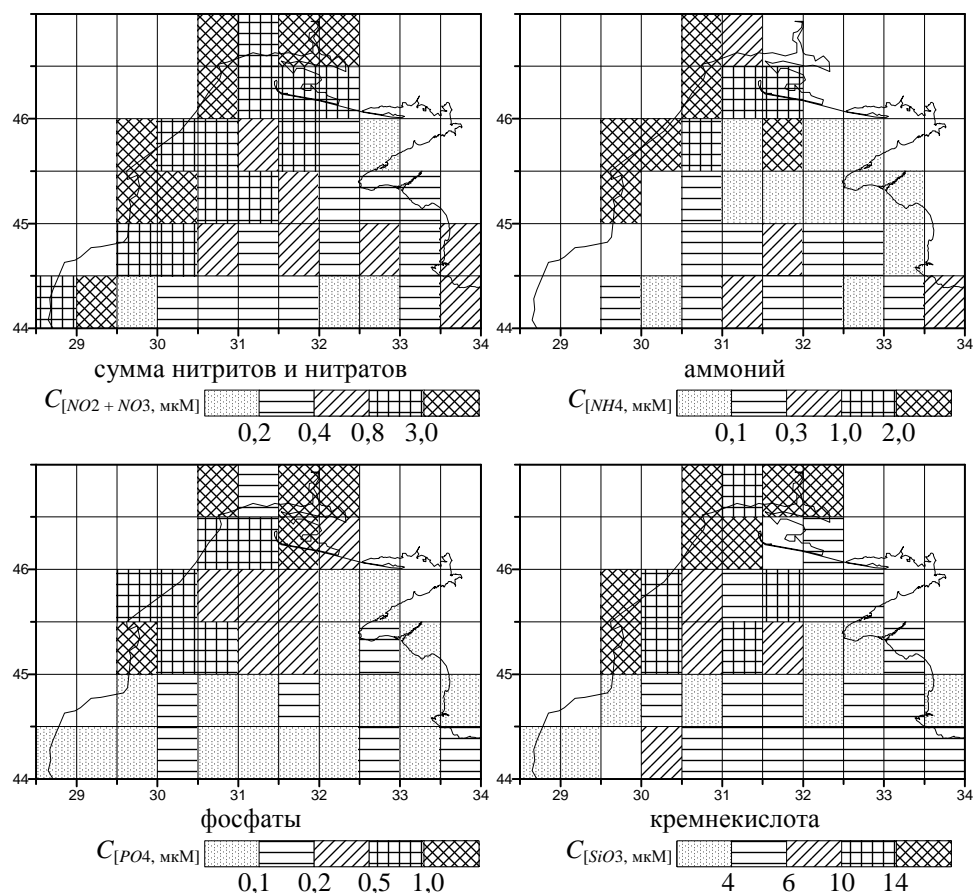


Р и с . 3 . Обеспеченность данными наблюдений верхнего 30 м слоя вод СЗЧ (квадраты без заливки – данные отсутствуют)

Пространственная изменчивость содержания биогенных элементов.

Распределение среднееголетних значений концентраций окисленных соединений азота (сумма нитритов и нитратов), аммония, фосфатов и кремнекислоты в верхнем 30 м слое вод СЗЧ представлено на рис.4. Отметим, что нитриты составляют незначительную долю от суммарного содержания окисленных соединений азота в воде. Исходя из среднееголетних значений, их доля может варьировать от 0 до 39 % по отдельным квадратам (в среднем 16 ± 3 %). Поля среднееголетних значений концентраций неорганических соединений азота, фосфора и кремния имеют четко выраженную структуру, идентичную для всех соединений. Максимальные значения (достигающие десятков мкМ) характерны для районов, расположенных в непосредственной близости от устьев крупных рек (Дуная, Днепра, Днестра). Далее по мере удаления от приустьевых зон концентрации биогенных элементов постепенно снижаются до минимальных для СЗЧ значений, которые не превышают для нитритов и фосфатов 0,1 мкМ, нитратов и аммония 0,5 мкМ, кремнекислоты 5 мкМ. Некоторое увеличение концентраций минерального азота и фосфора наблюдается в непосредственной близости от крымского побережья.

Область низких концентраций, характеризующаяся однородным распределением гидрохимических параметров, ограничена с востока 32° в.д. и с юга 45° с.ш. Исключение составляет граница распространения повышенных кон-

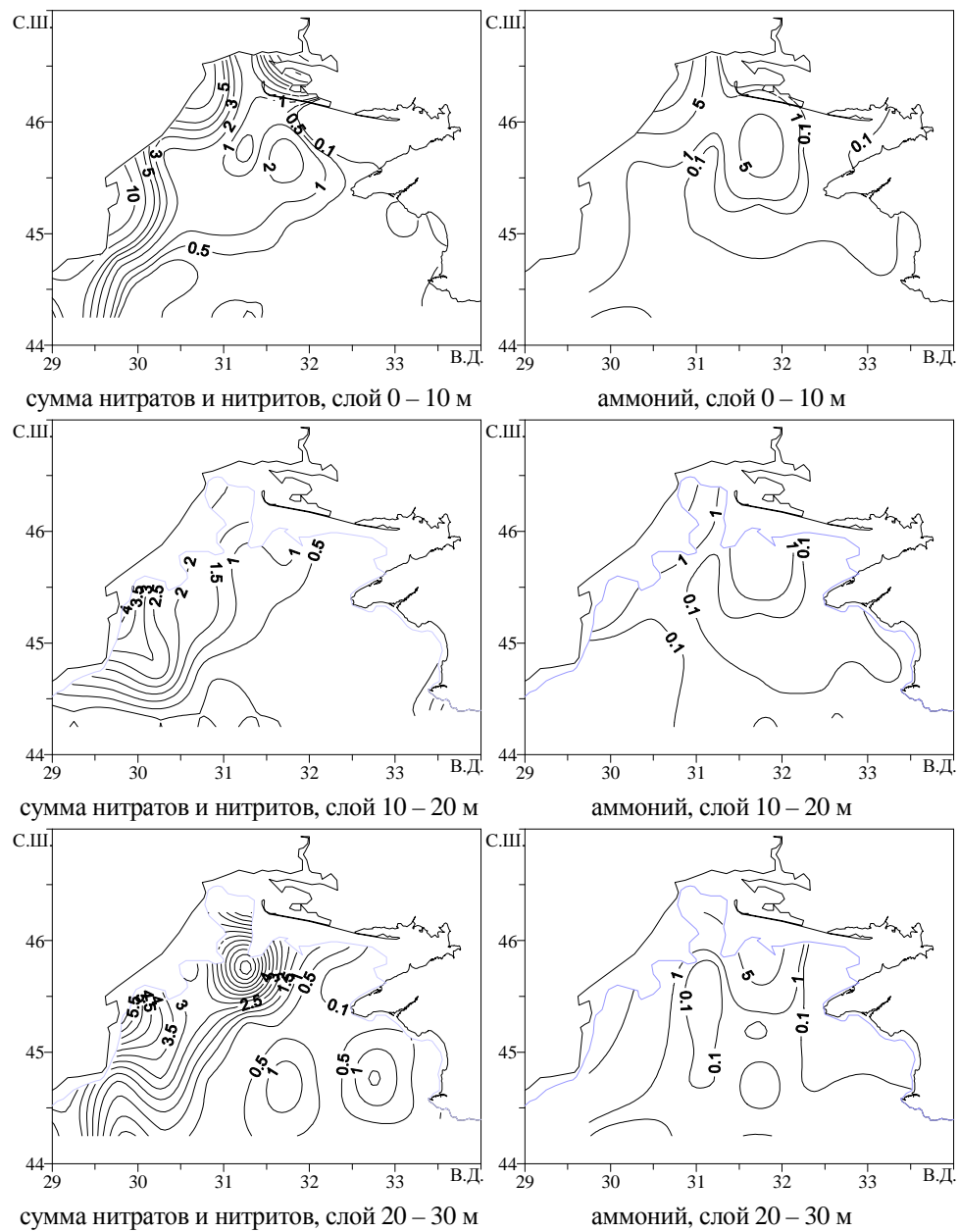


Р и с . 4 . Среднегодовые концентрации неорганических форм азота, фосфора и кремния в верхнем 30 м слое вод СЗЧ (квадраты без заливки – данные отсутствуют).

центраций окисленных соединений азота, которая располагается несколько южнее (на 44,5° с.ш.) за счет их более высокого содержания в нижних слоях водной толщи (рис.5).

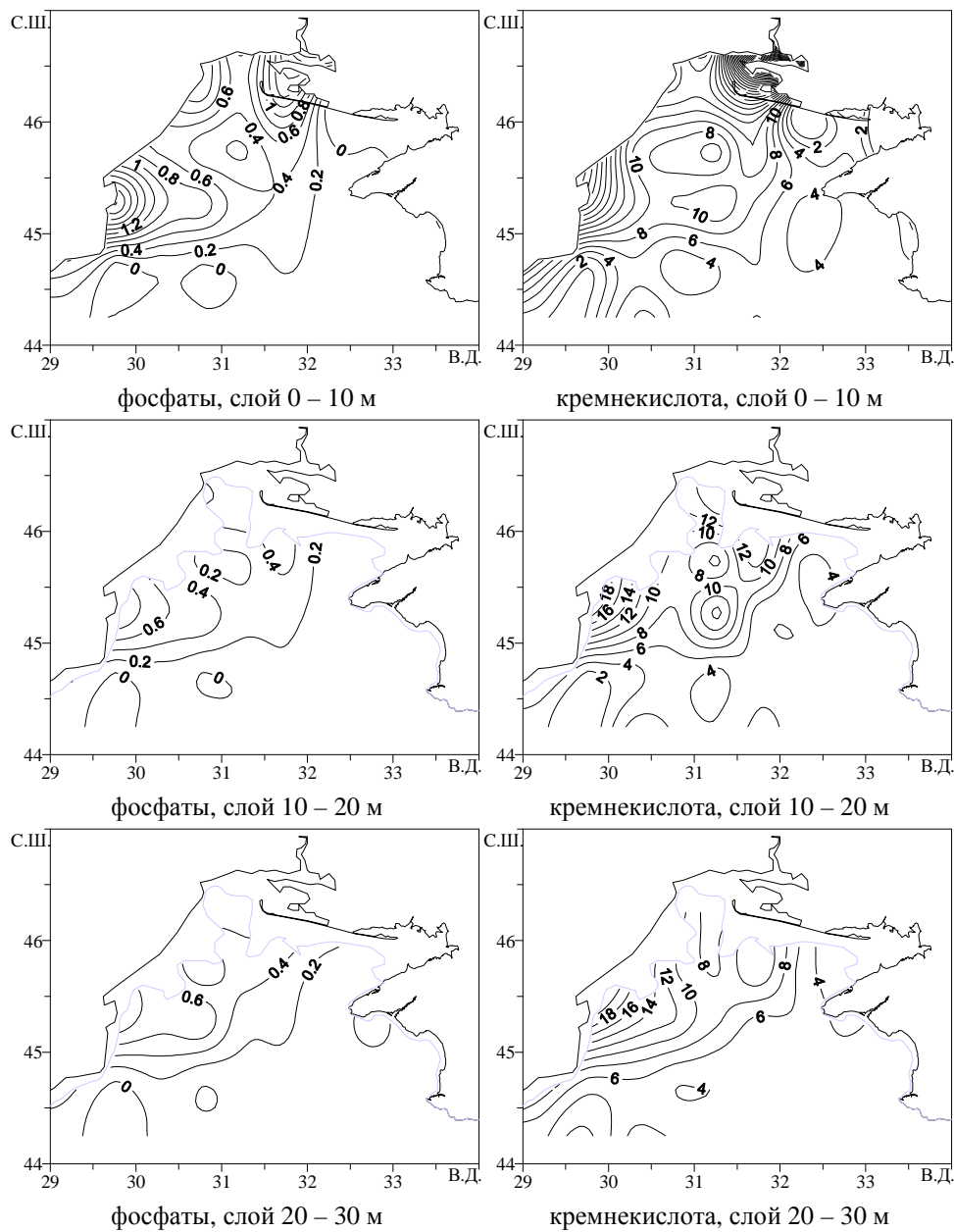
Различие в распределении концентраций на поверхности и в глубже лежащих слоях водной толщи проявляется и для других соединений (рис.5). Так, при сравнении пространственного распределения фосфатов и кремнекислоты в поверхностном и придонном слоях прослеживается тенденция к сужению области с повышенными концентрациями этих элементов в северо-западном направлении. Для аммония характерно возникновение локальных областей повышенных концентраций данного соединения в придонном слое. Отличия между распределением неорганических соединений азота и минеральных форм фосфора и кремния по слоям, вероятно, связаны с особенностями биогеохимического цикла азота, например, дополнительным поступлением нитритов и нитратов в результате процесса нитрификации, а также регенерации аммония в донных осадках и прилегающем слое вод [12].

В целом, в поле среднееголетних значений концентраций всех рассматриваемых параметров можно выделить три области (рис.6). Область максимальных концентраций, где влияние речного стока на гидрохимические ус-



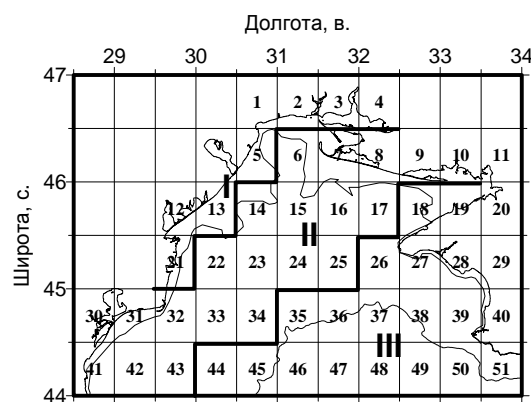
Р и с . 5 . Среднегодовые концентрации неорганических соединений азота (мкМ), фосфора (мкМ) и кремния (мкМ) в слоях 0 – 10; 10 – 20 и 20 – 30 м в СЗЧ.

ловия вод проявляется в течение всего года (область 1). Это районы, непосредственно прилегающие к берегу. Область высоких концентраций, соответствующая зоне распространения трансформированных речных вод, границы которой может варьировать в течение года в зависимости от интенсивности речного стока и ветровых условий (область 2). Область относительно низких концентраций биогенных элементов, где на протяжении всего года выраженное влияние речного стока отсутствует (область 3).



Продолжение рис. 5.

Аналогичное деление СЗЧ предложено исходя из пространственного распределения солености вод на северо-западном шельфе моря [13]. Максимальные концентрации биогенных элементов характерны для зоны первичной трансформации речных вод ($S = 3 - 10 \text{ ‰}$), высокие значения наблюдаются в зонах вторичной и полной трансформации речных вод ($S = 10 - 17 \text{ ‰}$), относительно низкие величины характеризуют воды с соленостью $> 17 \text{ ‰}$, которые принято считать морскими водами СЗЧ [14]. Положение границ выделенных областей изменяется от сезона к сезону. Наиболее под-



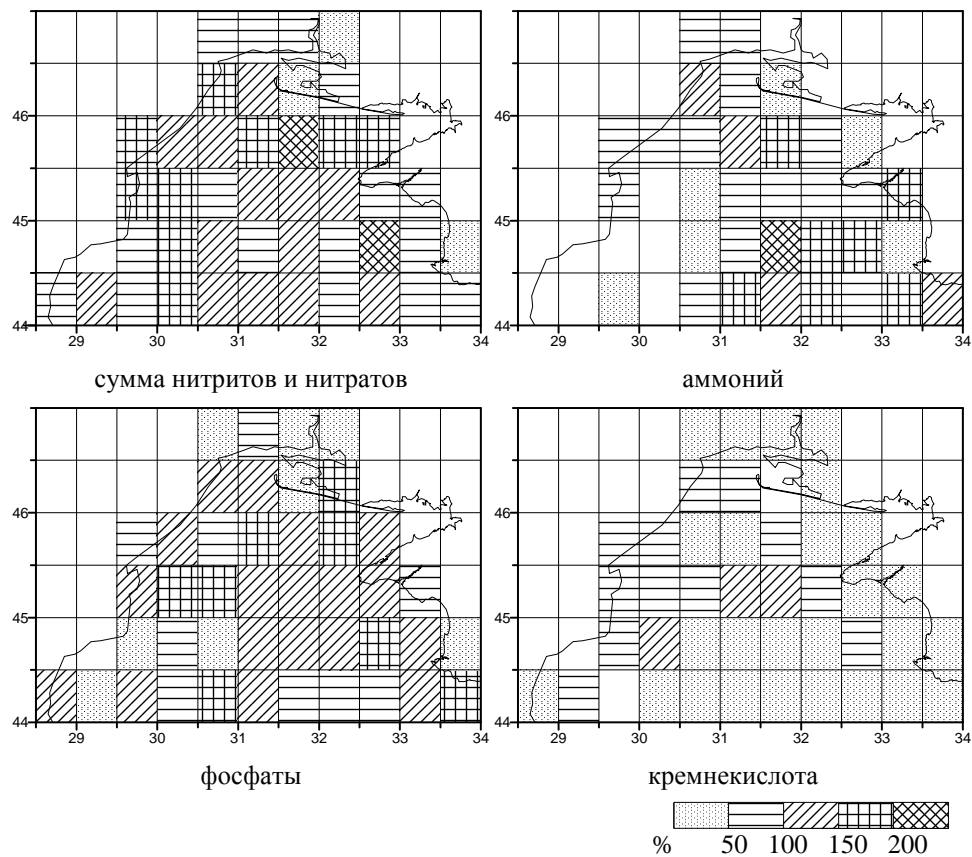
Р и с . 6 . Схема расположения и номера квадратов (арабские цифры) и районов (римские цифры) на СЗЧ.

в северо-западном направлении на $1 - 1,5^\circ$. Можно предположить, что именно в этой области влияние сезонной динамики речного стока на структуру гидрохимических полей наиболее выражено.

В качестве показателя временной изменчивости полей нитритов, нитратов, аммония, фосфатов и кремнекислоты в северо-западной части Черного моря были использованы величины стандартного отклонения, выраженные в процентах от среднесуточных значений концентраций этих соединений (рис.7). На рассматриваемой акватории моря величины стандартного отклонения в слое $0 - 30$ м составляют в среднем 100% для неорганических соединений азота и фосфора и около 50% для кремнекислоты. Прослеживается тенденция к увеличению данного показателя (в $1,5 - 2$ раза) в центральной части мелководного шельфа, которая может быть объяснена более высокой амплитудой колебаний концентраций биогенных элементов, связанной с временной динамикой распространения трансформированных речных вод под действием поля ветра. Кроме того, повышенные значения стандартного отклонения отмечаются в области свала глубин на юге исследуемого района, что может быть связано с высокой динамической активностью вод в этом районе.

Заключение. Анализ пространственного распределения среднесуточных значений концентраций основных биогенных элементов позволяет в пределах северо-западного шельфа Черного моря выделить три области:

- область максимальных концентраций, где содержание неорганических соединений фосфора достигает нескольких мкМ, азота и кремния – десятки мкМ. Очевидно, что она совпадает с зоной первичной трансформации речных вод и характеризуется максимально высоким уровнем продуктивности [8, 15];
- область высоких концентраций, которая ограничивается 32° в.д. и $44,5 - 45^\circ$ с.ш. и характеризуется широкой вариабельностью концентраций основных биогенных элементов за счет сезонной изменчивости положения границы зоны распространения трансформированных речных вод;
- область относительно низких концентраций биогенных элементов, где в течение всего года не прослеживается прямого влияния речных вод на гидрохимический режим; по площади она составляет около половины северо-западного шельфа и химический состав ее вод соответствует морским водам СЗЧ.



Р и с . 7 . Стандартное отклонение среднемноголетних значений концентраций неорганических соединений азота, фосфора и кремния (%) в верхнем 30 м слое вод СЗЧ.

Таким образом, пространственное распределение среднемноголетних значений неорганических соединений азота, фосфора и кремния соответствует сложившимся представлениям о формировании гидрофизического и гидрохимического режима, а также биологической продуктивности северо-западного шельфа Черного моря. Поэтому созданный массив данных может быть корректно использован для целей математического моделирования. Планируемый в дальнейшем анализ внутри- и межгодовой динамики рассмотренных параметров позволит использовать имеющийся массив данных для оценки уровня эвтрофикации вод и его изменчивости в различных районах СЗЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов М.Е., Сапожников В.В., Шушкина Э.А.* Экосистема Черного моря.– М.: Наука.– 1992.– 112 с.
2. *Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И., Берлинский Н.А., Гончаров А.Ю.* Районирование украинского сектора северо-западной части Черного моря (по гидрофизическим и гидрохимическим характеристикам) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000.– С.9-24.
3. *Зайцев Ю.П.* Экологическое состояние шельфовой зоны Черного моря у побережья Украины (обзор) // Гидробиологический журнал.– 1992.– 28, №4.– С.3-18.

4. *Иванов В.А., Кубряков А.И., Любарцева С.Н., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б.* Моделирование некоторых особенностей гидрологических и экологических ситуаций в районе о.Змеиный // Природные условия взморья реки Дунай и острова Змеиный: современное состояние экосистемы. Под ред. В.А.Иванова, С.В.Гошовского.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 1999.– С.184-208.
5. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей СССР. Том 4: Черное море. Вып.1: Гидрометеорологические условия. Проект «Моря СССР» / Под ред. А.И.Симонова, Э.Н.Альтмана.– СПб: Гидрометеиздат, 1991.– 430 с.
6. *Кропотов С.И.* Пространственно-временная изменчивость относительной прозрачности вод Черного моря // Морской гидрофизический журнал.– 1996.– 4.– С.36-45.
7. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей СССР. Том 4: Черное море. Вып.2: Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. Проект «Моря СССР» / Под ред. А.И.Симонова, А.И.Рябининой, Д.Е. Гершановича.– СПб: Гидрометеиздат, 1992.– 220 с.
8. *Кропотов С.И., Кривенко О.В.* Хлорофилл «а» и продукты его распада в водах Черного моря: сезонная и межгодовая изменчивость // Журнал общей биологии.– 1999.– 5.– С.556-570.
9. *Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря.– Л.: Гидрометеиздат, 1984.– 240 с.
10. *Геворгиз Н.С., Еремеева Л.В., Кондратьев С.И.* Гидрохимический режим // Природные условия взморья реки Дунай и острова Змеиный: современное состояние экосистемы. Под ред. В.А.Иванова, С.В.Гошовского.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 1999.– С.79-87.
11. *Берсенева Г.П.* Сезонная динамика концентрации хлорофилла «а» // Планктон Черного моря.– Киев: Наукова думка, 1993.– С.92-109.
12. *Friedrich J., Friedl G., Bondar C. et al* Spatial and temporal variability of benthic fluxes and diagenetic pathways of organic matter in the Northwestern Black Sea // Oceanography of eastern Mediterranean and Black Sea: similarities and differences of two interconnected basins.– Ankara: Tübitak, 2003.– P.536-543.
13. *Ильин Ю.П.* Гидрологическая структура вод при различных ветровых ситуациях по данным полигонных и спутниковых наблюдений // Природные условия взморья реки Дунай и острова Змеиный: современное состояние экосистемы. Под ред. В.А.Иванова, С.В.Гошовского.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 1999.– С.134-146.
14. *Большаков В.С.* Трансформация речных вод в Черном море.– Киев: Наукова думка, 1970.– 328 с.
15. *Бурлакова З.П., Еремеева Л.В., Коновалов С.К.* Сезонная и пространственная изменчивость содержания взвешенного органического вещества в деятельном слое Черного моря // Морской гидрофизический журнал.– 1998.– 5.– С.30-62.

Материал поступил в редакцию 06.12.2004 г.
После доработки 27.05.2005 г.