

УДК 581.526.325:581.132(262.5)

## СЕЗОННЫЕ И МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА В ЧЕРНОМ МОРЕ ПО СПУТНИКОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

© 2014 г. З. З. Финенко<sup>1</sup>, В. В. Суслин<sup>2</sup>, И. В. Ковалева<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского, НАН Украины, Севастополь,<sup>2</sup>Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь,

e-mail: zosim\_finenko@mail.ru

Поступила в редакцию 12.06.2013 г., после доработки 07.10.2013 г.

По спутниковым данным, полученным сканером SeaWiFS в период с 1998 по 2008 гг., исследована пространственная и временная изменчивость концентрации хлорофилла в поверхностном слое Черного моря. Установлено, что в глубоководной части моря сезонные изменения хлорофилла имеют U-образную форму. Максимальные значения наблюдаются в зимне-весенний и осенний периоды, минимальные — летом. В северо-западной части моря максимальные значения хлорофилла зарегистрированы в основном в летний и осенний периоды. В течение 11-ти летнего периода обнаружены межгодовые изменения в концентрации хлорофилла. В годы с холодными зимами концентрация хлорофилла в зимне-весенний период в 3–5 раз выше, чем в годы с умеренно-теплыми зимами. Между средними значениями хлорофилла и температуры с декабря по март выявлена обратная зависимость.

DOI: 10.7868/S0030157414050062

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В Черном море определения концентрации хлорофилла “а” ( $C_a$ ) были начаты в 1960 г [4]. За истекший период времени накоплен достаточно большой фактический материал, позволивший определить пределы изменений  $C_a$  в различные годы и сезоны [1, 3, 8, 9, 15]. Однако эти данные не позволяют правильно описать сезонную динамику  $C_a$ . По результатам выполненных исследований некоторые авторы проводили оценку средне-многолетнего сезонного хода  $C_a$  в глубоководной части моря [3, 6]. Следует иметь в виду, что эти данные получены путем осреднения разрозненных измерений, выполненных в разные годы и сезоны, и не учитывают межгодовые сезонные колебания. Высокая вариабельность  $C_a$  в пространстве и времени требует, чтобы сбор данных, необходимых для оценки сезонной и межгодовой динамики, проводился в короткий период времени, с высокой частотой в масштабах десятков-сотен километров. Получение такой информации даже на специализированном научно-исследовательском судне часто оказывается неосуществимой задачей. Многих методических трудностей сбора данных можно избежать при определении  $C_a$  по спутниковым наблюдениям, которые проводятся ежедневно с высокой дискретностью по всей акватории моря в течение длительного времени.

Цель работы — выявить закономерности сезонного хода и межгодовой изменчивости кон-

центрации хлорофилла в поверхностном слое Черного моря, полученные в результате обработки спутниковых измерений, выполненных сканером цвета SeaWiFS в 1998–2008 гг.

### 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения хлорофилла в поверхностном слое использованы данные прибора SeaWiFS с 1998 по 2008 гг., полученные из Годдардского центра обработки и хранения данных NASA. Это ежедневные с 4-х км пространственным разрешением данные нормализованной спектральной яркости водной поверхности ( $nLw$ ) на трех длинах волн 490, 510 и 555 нм, которые получены после стандартной атмосферной коррекции и удовлетворяют специальным критериям. Версия данных — R2010.0. Расчет хлорофилла базировался на двух индексах:  $I_{510} = nLw(555)/nLw(510)$  и  $I_{490} = nLw(510)/nLw(490)$ , которые осреднялись за двухнедельный период на пространственной сетке 0.025 градусов по широте и 0.035 градусов по долготе. Алгоритм расчета  $C_a$  и критерии отбора  $nLw$  подробно описаны в работе [7]. Индексы  $I_{510}$  и  $I_{490}$  учитывают изменение поглощения окрашенного растворенного вещества, слабо чувствительны к ошибкам атмосферной коррекции и обратному рассеянию света взвесью и более точно (как показано в [7]) восстанавливают концентрацию хлорофилла по спутниковым данным по сравнению с алгоритмами, использовавшимися

ранее [10, 11]. Температура поверхности моря получена из спутниковых наблюдений <http://podaac.jpl.nasa.gov/sst/> (1998–2000 гг.) и <http://ocean-color.gsfc.nasa.gov> (2000–2008 гг.) и согласована с пространственно-временными характеристиками полей хлорофилла, полученных по данным SeaWiFS.

Статистические параметры рассчитывались в программе Sigma Plot в пакете ANOVA.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

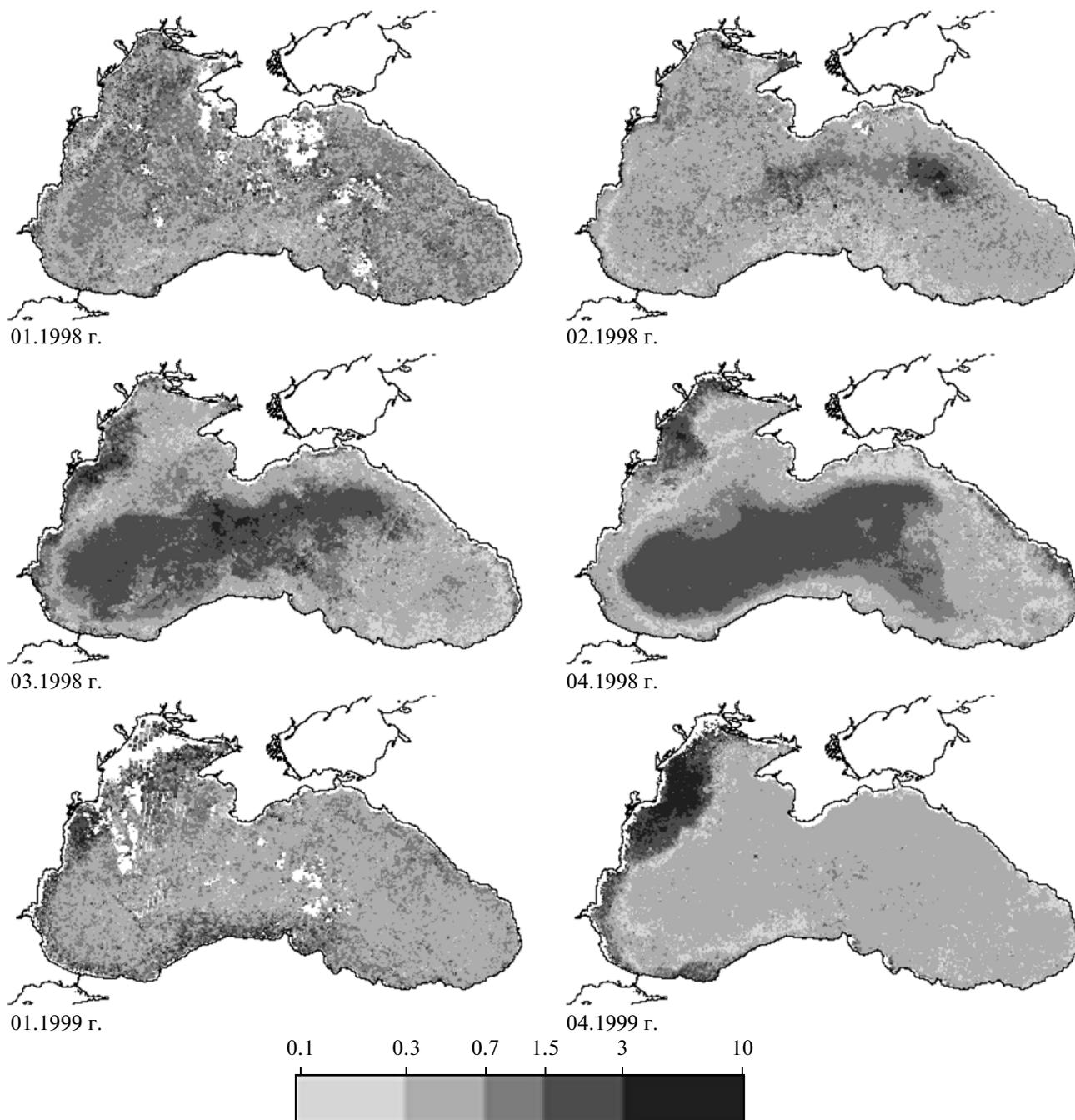
**Пространственная изменчивость концентрации хлорофилла.** В качестве примера на рис. 1 приведены результаты измерений среднемесячных концентраций хлорофилла в поверхностном слое моря в 1998, 1999 и 2003 гг., которые соответствуют средней, низкой и высокой продуктивности фитопланктона. В течение всего исследованного периода северо-западная часть моря отличается от других районов более высокими значениями  $C_a$ . В приустьевых районах максимальные концентрации, достигающие нескольких десятков микрограмм в литре, наблюдаются в конце весны и в начале лета, минимальные – в холодный период года. К востоку от районов, находящихся под влиянием стока речных вод, концентрация хлорофилла быстро снижается. Обогащающее действие речного стока наблюдается лишь вблизи от берега (рис. 1). Для устьевых и прилегающих к ним районов характерна высокая вариабельность концентрации хлорофилла, которая обусловлена изменением ветровой активности, речного стока и поступающих с ним биогенных веществ. Формирующиеся вдоль береговой линии течения и синоптические вихри определяют особенности горизонтального распределения концентрации хлорофилла. Перенос фитопланктона вдоль береговой линии от устья Дуная на юг играет важную роль в продуктивности западного шельфа.

В водах Анатолийского шельфа на фоне умеренных концентраций хлорофилла ( $0.3–0.5 \text{ мг/м}^3$ ) изредка образуются локальные продуктивные зоны с значениями  $C_a$   $1–2 \text{ мг/м}^3$ . Летом концентрация хлорофилла в водах Анатолийского шельфа несколько выше, чем в глубоководной части моря. В то же время в северной части значения хлорофилла в прибрежных и открытых водах достоверно не различаются. В зоне ОЧТ в летне-осенний период образуются синоптические антициклональные вихри и меандры, которые переносят прибрежный фитопланктон в открытую часть моря, что может приводить к кратковременным локальным всплескам фитопланктона в открытой части и высокой пространственной гетерогенности поля хлорофилла. Средние значения  $C_a$  в глубоководных районах западной и восточной частях моря могут различаться в несколько раз.

Граница, отделяющая глубоководную часть моря от шельфовой зоны, в зависимости от синоптической активности изменяется в пространстве. В зимне-весенний период основное черноморское течение является эффективным барьером между прибрежными и открытыми районами моря. В глубоководной области в холодные и умеренно холодные зимы наблюдается интенсивное развитие фитопланктона, которое начинается в виде отдельных пятен над куполами циклональных круговоротов. В течение нескольких недель они расширяются и сливаются в одно пятно, с размерами несколько сот километров, как например, в марте 1998 г. (рис. 1). Напротив, в годы с теплыми зимами, когда температура воды в поверхностном слое не опускается ниже  $8^\circ\text{C}$  и обмен между поверхностными и глубинными водами идет медленно, концентрация хлорофилла не превышает  $0.5 \text{ мг/м}^3$ . Среднемесячный коэффициент пространственной вариации  $C_a$  в зимне-весенний период варьирует в пределах  $40–65\%$ , а летом он в два раза ниже.

**Сезонная изменчивость.** Для сравнения сезонной динамики концентрации хлорофилла в поверхностном слое акватория моря была разделена на 11 районов: из них 4 находилось в глубоководной части моря и 7 – в пределах шельфа (рис. 2). В течение 11-летнего периода внутрigoдovые сезонные изменения  $C_a$  в 4 глубоководных районах моря имеют одинаковый вид, повторяющийся из года в год (рис. 3). Максимальные значения  $C_a$  ( $0.5–3.0 \text{ мг/м}^3$ ) наблюдаются в основном в зимний период, и только в отдельные годы – весной, минимальные величины характерны для летнего периода ( $<0.5 \text{ мг/м}^3$ ) (таблица). В зимний период интенсивное развитие фитопланктона продолжается  $1–2$  месяца. В западной и восточной частях моря оно проходит практически одновременно, и только в 2003 г. был зарегистрирован разрыв во времени: в западной части максимальные значения  $C_a$  наблюдались в январе, в восточной – в первой половине апреля (рис. 3). В годы с суровыми зимами, когда температура воды в поверхностном слое снижается ниже  $8^\circ\text{C}$ , создаются благоприятные условия для плотностной конвекции и поступления биогенных веществ из глубины в эвфотический слой. В такие годы (1998, 2003 и 2004 гг.) концентрация хлорофилла достигает  $1–3 \text{ мг/м}^3$  и в 2–4 раза выше, чем в годы с теплыми зимами.

Летом  $C_a$  в глубоководных районах варьирует в пределах  $0.2–0.6 \text{ мг/м}^3$ . Минимальные летние значения наблюдаются в августе, максимальные летние – в начале лета, когда обычно происходит интенсивное развитие кокколитофорид, сопровождающееся ростом концентрации хлорофилла. Начиная с сентября,  $C_a$  непрерывно повышается и плавно переходит в зимне-весенний максимум (таблица).



**Рис. 1.** Пространственное и временное распределение концентрации хлорофилла в поверхностном слое Черного моря в 1998, 1999 и 2003 гг. (цифрами обозначены месяцы).

На шельфе, расположенном вдоль Румынского, Болгарского и Украинского берегов, сезонный цикл характеризуется несколькими максимумами, из которых наиболее мощный развивается летом (рис. 4). Продолжительность летнего развития фитопланктона варьирует от 2 до 3 месяцев. Зимнее и осеннее “цветение” фитопланктона по длительности и амплитуде меньше летнего. В целом,

для районов северо-западного шельфа характерна высокая вариабельность  $C_a$  в течение года.

Вдоль Анатолийского шельфа сезонный цикл характеризуется зимним (декабрь–февраль) развитием фитопланктона, которое продолжается от одного до двух месяцев. В 2000, 2003–2004 гг. максимальные значения  $C_a$  достигали  $3 \text{ мг/м}^3$ , в другие годы они не превышали  $1.5 \text{ мг/м}^3$ . Можно предпо-

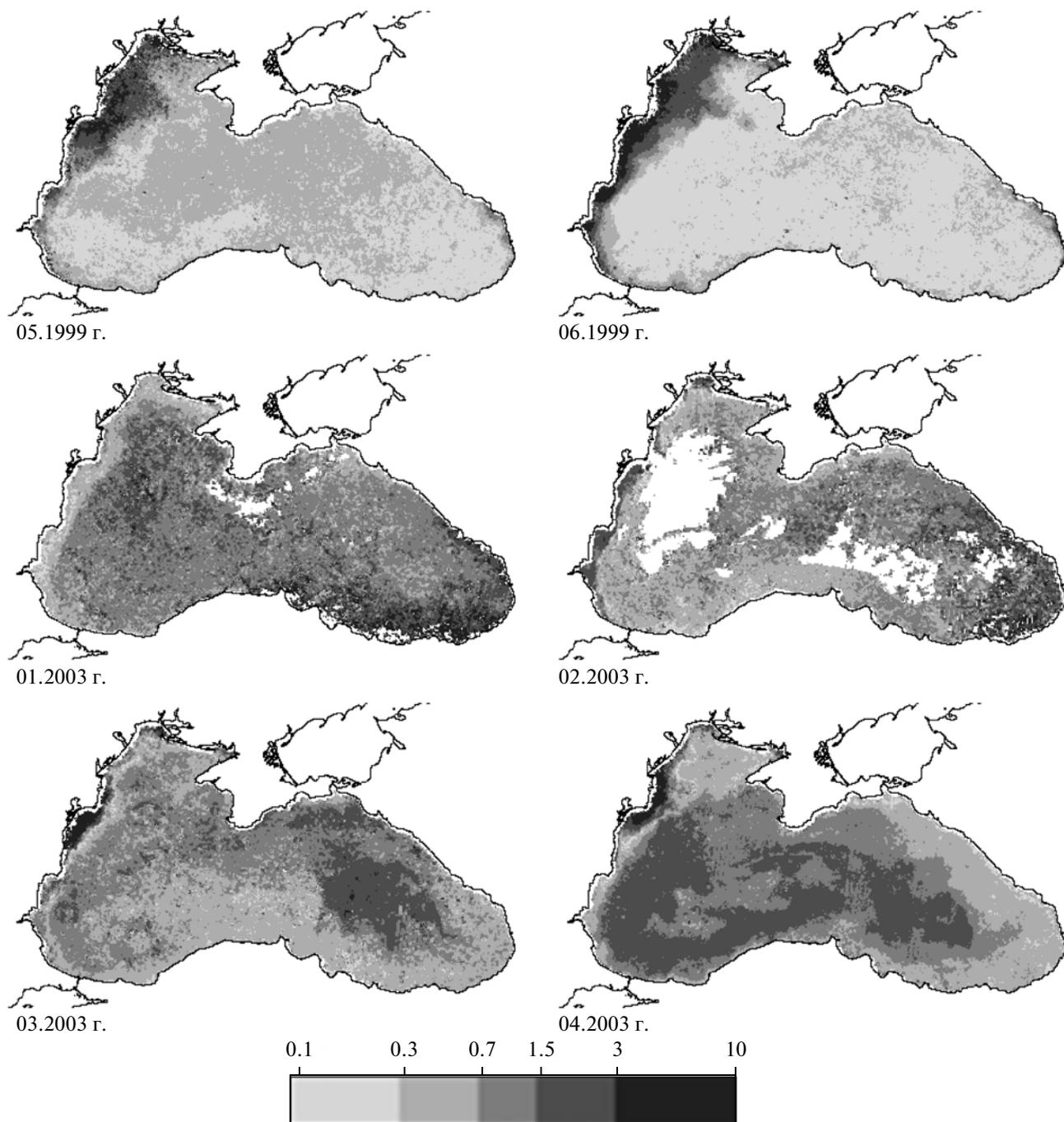


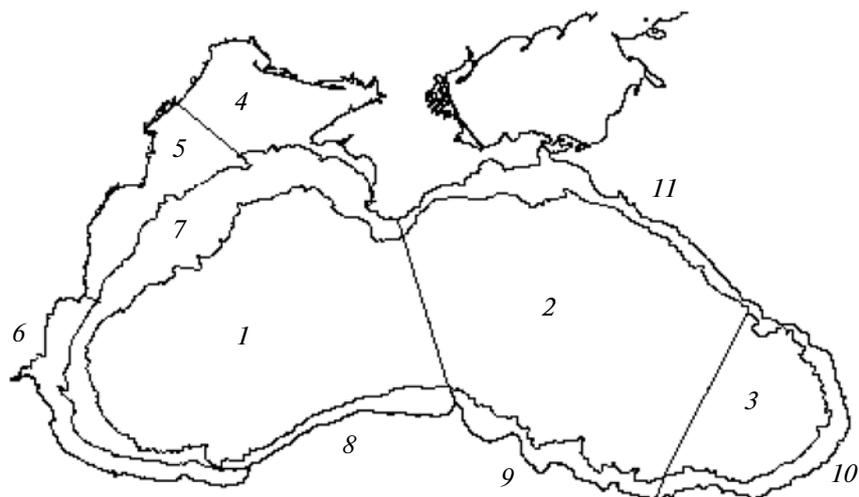
Рис. 1. Окончание.

ложить, что движение воды, вызванное синоптическими процессами, в значительной степени определяет межгодовую изменчивость  $C_a$  в холодный период. Летом средние значения  $C_a$  находились в пределах  $0.25\text{--}0.35 \text{ mg}/\text{m}^3$  и не отличались от величин, характерных для прилегающих открытых вод.

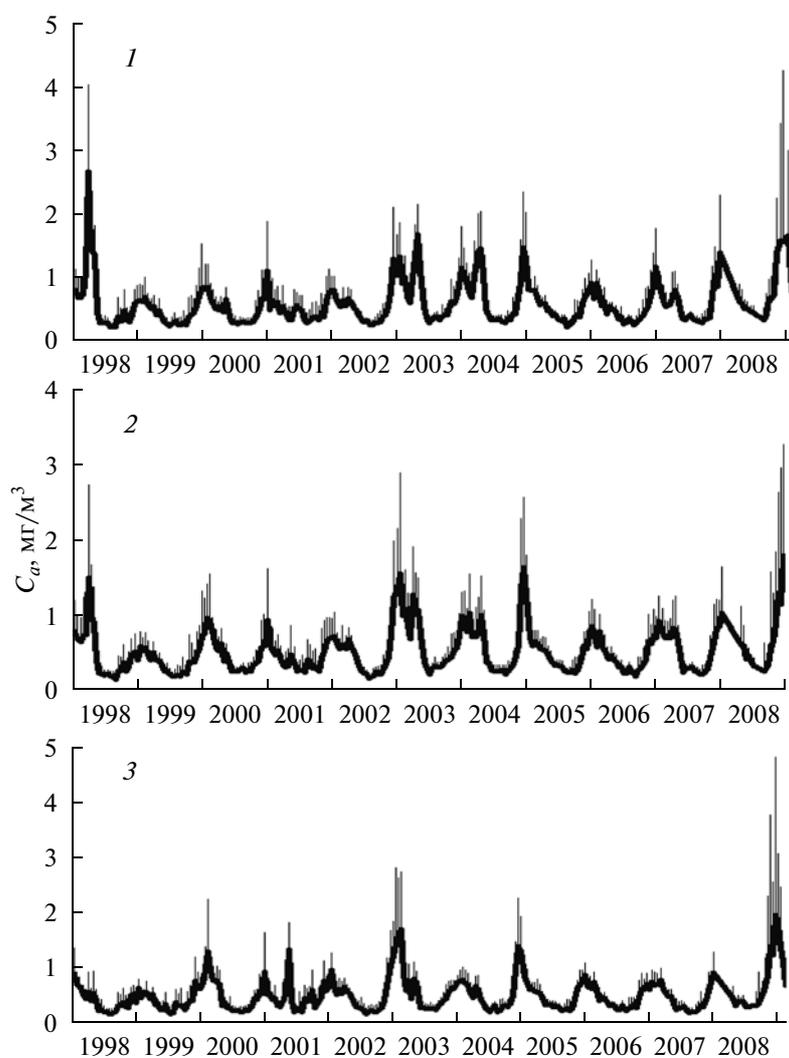
Минимальные величины  $C_a$  по сравнению с другими районами черноморского шельфа зарегистрированы вдоль Кавказских и Крымских берегов. В

зимний сезон они в основном были  $<1.0 \text{ mg}/\text{m}^3$  и только в 2000 и 2003 гг. достигали  $2.0 \text{ mg}/\text{m}^3$ , летом —  $0.2\text{--}0.3 \text{ mg}/\text{m}^3$ .

Таким образом, результаты проведенных исследований позволили получить детальную картину сезонной и межгодовой динамики  $C_a$  для всей акватории моря. Из анализа результатов следует, что в глубоководной части моря сезонное изменение концентрации хлорофилла имеет U-об-



**Рис. 2.** Схема районов, для которых проведено сравнение сезонных изменений концентрации хлорофилла в поверхностном слое моря.



**Рис. 3.** Сезонные изменения концентрации хлорофилла в районах (1, 2, 3), расположенных в глубоководной части Черного моря (бары – стандартное отклонение).

Среднесезонные изменения концентрации хлорофилла за период 1998–2008 гг.

Регион 1	Зима	Весна	Лето	Осень
1998	0.69 ± 0.05	1.19 ± 0.86	0.22 ± 0.03	0.34 ± 0.07
1999	0.59 ± 0.04	0.40 ± 0.09	0.23 ± 0.03	0.35 ± 0.11
2000	0.72 ± 0.11	0.47 ± 0.09	0.25 ± 0.01	0.37 ± 0.16
2001	0.64 ± 0.22	0.39 ± 0.08	0.38 ± 0.12	0.39 ± 0.11
2002	0.66 ± 0.11	0.52 ± 0.09	0.26 ± 0.04	0.41 ± 0.19
2003	1.02 ± 0.24	1.02 ± 0.44	0.31 ± 0.04	0.48 ± 0.13
2004	0.88 ± 0.17	0.95 ± 0.44	0.29 ± 0.02	0.49 ± 0.24
2005	0.95 ± 0.32	0.51 ± 0.10	0.28 ± 0.07	0.42 ± 0.15
2006	0.74 ± 0.14	0.45 ± 0.09	0.27 ± 0.05	0.42 ± 0.16
2007	0.78 ± 0.22	0.57 ± 0.14	0.4 ± 0.04	0.66 ± 0.28
2008	1.12 ± 0.21	0.51 ± 0.05	0.37 ± 0.07	0.82 ± 0.41
Регион 2	Зима	Весна	Лето	Осень
1998	0.72 ± 0.06	0.81 ± 0.45	0.20 ± 0.03	0.33 ± 0.08
1999	0.52 ± 0.07	0.39 ± 0.08	0.21 ± 0.03	0.35 ± 0.10
2000	0.79 ± 0.15	0.51 ± 0.10	0.27 ± 0.02	0.37 ± 0.11
2001	0.62 ± 0.17	0.38 ± 0.07	0.32 ± 0.07	0.42 ± 0.16
2002	0.66 ± 0.07	0.52 ± 0.12	0.22 ± 0.03	0.39 ± 0.20
2003	1.19 ± 0.25	0.89 ± 0.33	0.30 ± 0.04	0.46 ± 0.09
2004	0.88 ± 0.14	0.68 ± 0.25	0.27 ± 0.02	0.56 ± 0.41
2005	0.93 ± 0.44	0.51 ± 0.10	0.30 ± 0.04	0.40 ± 0.16
2006	0.72 ± 0.11	0.43 ± 0.08	0.26 ± 0.05	0.44 ± 0.16
2007	0.73 ± 0.07	0.63 ± 0.19	0.37 ± 0.04	0.61 ± 0.23
2008	0.97 ± 0.03	0.52 ± 0.08	0.32 ± 0.06	0.76 ± 0.33
Регион 3	Зима	Весна	Лето	Осень
1998	0.69 ± 0.15	0.43±0.12	0.20 ± 0.03	0.34 ± 0.08
1999	0.51 ± 0.09	0.36±0.11	0.26 ± 0.09	0.41 ± 0.18
2000	0.86 ± 0.26	0.54±0.23	0.23 ± 0.02	0.37 ± 0.13
2001	0.56 ± 0.18	0.56±0.39	0.29 ± 0.10	0.48 ± 0.17
2002	0.66 ± 0.15	0.50±0.13	0.23 ± 0.04	0.36 ± 0.24
2003	1.32 ± 0.32	0.60±0.21	0.27 ± 0.01	0.45 ± 0.12
2004	0.72 ± 0.06	0.51±0.12	0.25 ± 0.04	0.45 ± 0.26
2005	0.91 ± 0.35	0.49±0.11	0.28 ± 0.04	0.42 ± 0.20
2006	0.71 ± 0.10	0.39±0.06	0.27 ± 0.04	0.43 ± 0.15
2007	0.71 ± 0.06	0.47±0.09	0.34 ± 0.04	0.53 ± 0.21
2008	1.05 ± 0.19	0.37±0.05	0.33 ± 0.05	0.78 ± 0.35
Регион 7	Зима	Весна	Лето	Осень
1998	0.70 ± 0.18	0.48±0.14	0.44 ± 0.19	0.48 ± 0.11
1999	0.64 ± 0.05	0.73±0.16	0.48 ± 0.11	0.49 ± 0.10
2000	0.78 ± 0.19	0.50±0.18	0.56 ± 0.31	0.45 ± 0.12
2001	0.87 ± 0.34	0.58±0.19	0.49 ± 0.28	0.47 ± 0.13
2002	0.74 ± 0.10	0.51±0.09	0.28 ± 0.11	0.55 ± 0.29
2003	0.90 ± 0.23	0.92±0.39	0.34 ± 0.13	0.53 ± 0.26
2004	1.10 ± 0.63	0.56±0.08	0.44 ± 0.27	0.53 ± 0.35
2005	1.06 ± 0.39	0.51±0.14	0.42 ± 0.20	0.55 ± 0.24
2006	0.80 ± 0.19	0.57±0.25	0.48 ± 0.26	0.54 ± 0.29
2007	0.95 ± 0.37	0.54±0.08	0.38 ± 0.03	0.68 ± 0.29
2008	1.34 ± 0.09	0.53±0.1	0.37 ± 0.05	0.95 ± 0.52

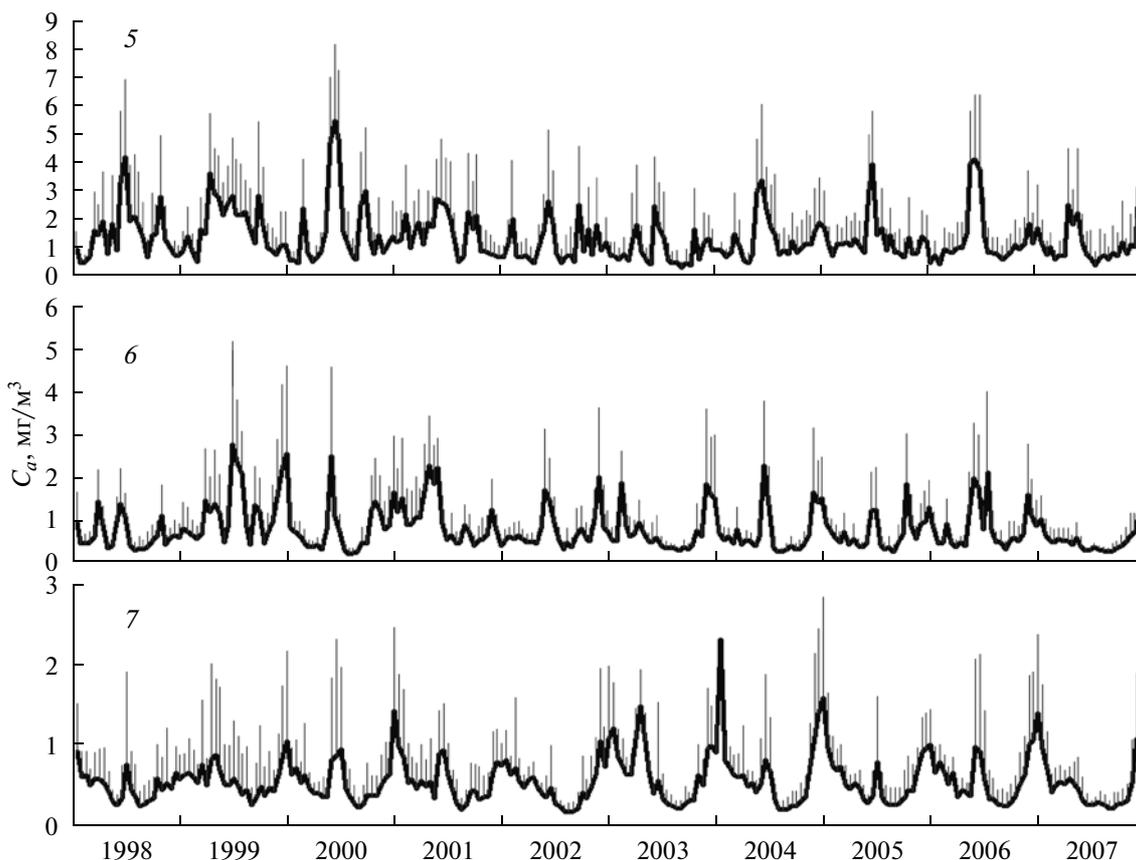


Рис. 4. Сезонные изменения концентрации хлорофилла в районах (5, 6, 7), расположенных в северо-западной части моря (бары – стандартное отклонение).

разную форму, которая регулярно повторяется из года в год. Интенсивное развитие фитопланктона происходит в зимний и весенний сезоны и сопровождается более высокими концентрациями хлорофилла по сравнению с летом (см. таблицу). Сезонные изменения  $C_a$  в глубоководной части Черного моря отличаются от других морей и районов океана, расположенных в умеренных широтах. Эти различия определяются глубиной пикноклина, залегающей в Черном море на гораздо меньшей глубине, чем в других морях.

В районах северо-западного мелководья, подверженных стоку рек в течение года, регистрируется несколько максимумов хлорофилла. В отличие от глубоководного района моря они чаще приурочены к летне-осеннему периоду.

**Межгодовые изменения концентрации хлорофилла.** Анализ межгодовой динамики  $C_a$  в прибрежных районах северо-западной части моря (районы 4–6) в период с 1998 по 2008 гг. указывает на наличие тренда с отрицательным знаком. Так в приднепровском районе и шельфовых водах у берегов Болгарии величина тренда составила  $0.02 \text{ мг/м}^3 \text{ год}$ , а в районе, находящемся под влиянием стока р. Дунай –  $0.05 \text{ мг/м}^3 \text{ год}$  (рис. 5).

В глубоководных районах моря (1–3) статистически достоверного тренда за весь период наблюдений не обнаружено, однако в летний период тренды имели слабый положительный знак (рис. 6).

В глубоководной части моря между значениями  $C_a$  и температуры воды в поверхностном слое, осредненными за двухнедельный период в течение года, наблюдается обратная зависимость (рис. 7). В зимний период при одинаковой температуре концентрация хлорофилла различается в несколько раз, тогда как в летний период в диапазоне температур  $20\text{--}27^\circ\text{C}$  эти изменения минимальны. В целом, концентрация хлорофилла в летний период более постоянна и не зависит от ее изменчивости в холодный период года. В то же время (с декабря по март) между средними значениями хлорофилла и температуры наблюдается обратная зависимость (рис. 8). В западном и восточном районах моря зависимость более тесная, чем в антициклональном круговороте, где зимнее развитие фитопланктона, очевидно, в большей мере контролируется поступлением биогенных веществ с речными стоками малых рек. В то же время корреляция между среднемесячной  $C_a$  и средней температурой воды за этот период отсутствует. В разные годы при одинаковой температу-

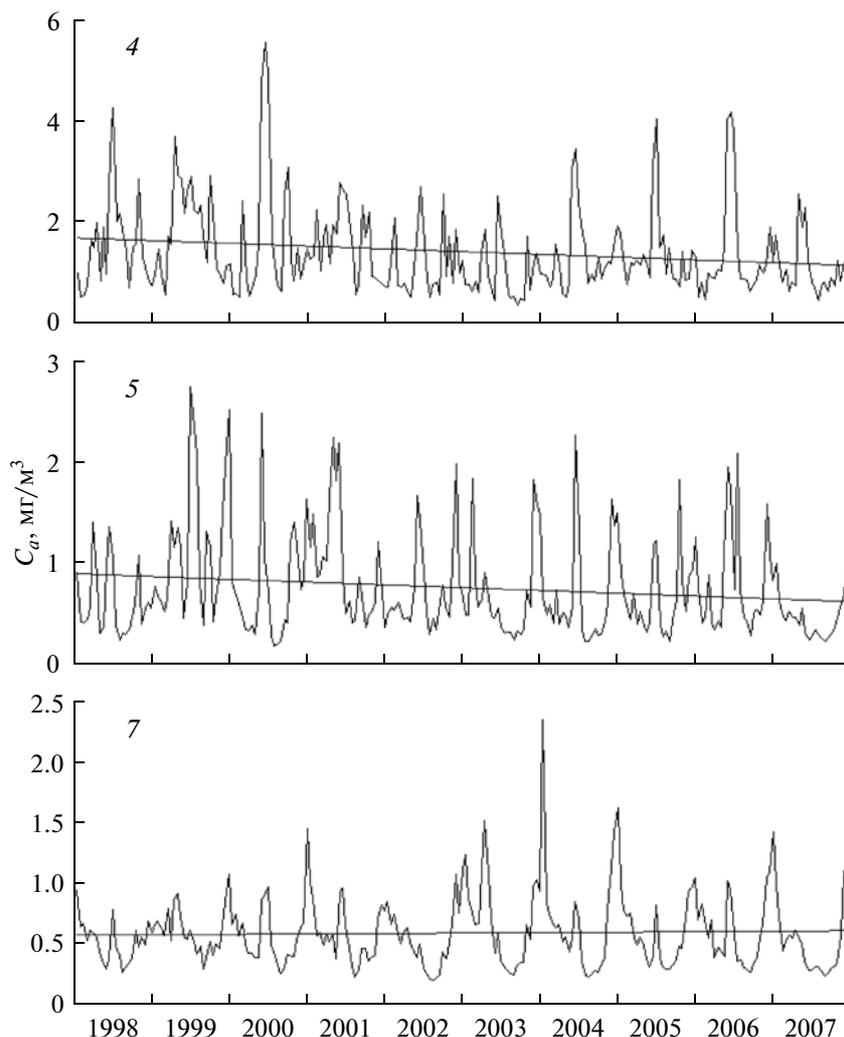


Рис. 5. Межгодовые тренды концентрации хлорофилла в районах, подверженных стоку рек Днепра (4), Дуная (5), и у континентального склона (7).

ре воды  $C_a$  может различаться в несколько раз. Таким образом, анализ многолетних данных показал, что в открытых районах моря статистически достоверный тренд в изменении  $C_a$  отсутствует. В районах, расположенных в северо-западной части моря, тренды имели отрицательный знак, что может указывать на снижение антропогенной нагрузки на прибрежные экосистемы.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

В 40–60-е годы была сформулирована общая концепция сезонного развития фитопланктона в районах, расположенных в различных широтах океана [14]. Согласно этой концепции, скорость роста фитопланктона зависит от двух физических факторов: солнечной радиации и силы ветра, которая определяет глубину перемешиваемого слоя и транспорт биогенных веществ из глубоких слоев моря к поверхности. Таким образом, облучен-

ность, концентрация питательных веществ и глубина верхнего перемешиваемого слоя определяют разнообразие сезонных циклов фитопланктона. В океанических водах умеренных широт зимняя конвекция достигает 500–1000 м. В этих условиях часть фитопланктона переносится турбулентной диффузией из зоны фотосинтеза на глубины, где фотосинтез из-за отсутствия света невозможен. В результате биомасса фитопланктона зимой достигает своего минимума. С увеличением солнечной радиации одновременно ослабевает сила ветра и уменьшается толщина перемешиваемого слоя. Большая часть водорослей остается в эвфотическом слое при достаточной облученности и относительно высоком содержании биогенных веществ, что и приводит к образованию весеннего пика фитопланктона.

Определение концентрации хлорофилла по спутниковым наблюдениям дало возможность с высокой частотой сканировать поверхность океа-

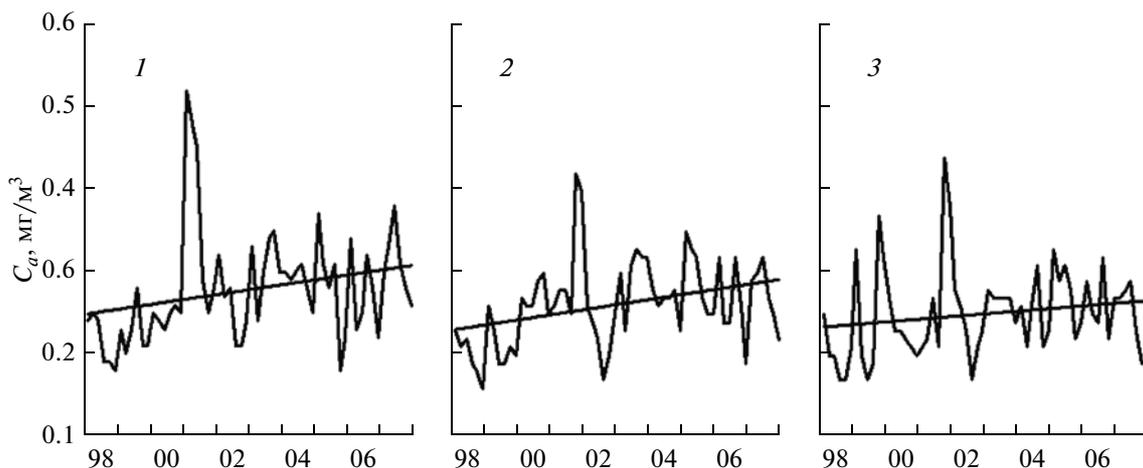


Рис. 6. Межгодовые тренды концентрации хлорофилла в поверхностном слое в глубоководных районах моря (1–3).

на и выявить закономерности сезонной динамики фитопланктона. Для глубоководной части моря, а также районов, расположенных вдоль анатолийского, кавказского и крымского побережья, годовой ход  $C_a$  имеет U-образную форму. Сравнение спутниковых данных с регулярными сериями годовых измерений *in situ*, проведенными в течение нескольких лет в открытых районах моря, подтверждает отмеченный выше характер изменения  $C_a$  в течение года [7]. Результаты систематических исследований, проведенные на выходе из пролива Босфор в 1996–2001 гг. [13], показали, что в течение 6 лет максимальные концентрации хлорофилла регулярно наблюдались зимой и осенью, минимальные – летом. Сходный сезонный ход изменения  $C_a$  получен по годовым сериям наблюдений в 2001–2004 гг. у м. Синоп [13]. Такая же форма сезонного хода  $C_a$  в глубоководной части Черного моря получена в результате обработки спутниковых измерений, выполненных сканером MODIS [10]. Однако наблюдаются расхождения, в частности, абсолютных значений  $C_a$  в холодный период в 2003–2004 гг. Одна из причин этого расхождения, по-видимому, заключается в разном наборе спектральных каналов, использовавшихся при оценке хлорофилла по спутниковым данным.

Таким образом, сезонные изменения  $C_a$ , установленные по спутниковым данным и по результатам систематических наблюдений, выполненных в глубоководной части моря, полностью совпадают.

Сезонный ход  $C_a$  в Черном море и в океанических водах умеренных широт различается. В пелагиали океана обычно отмечается два пика в развитии фитопланктона: один – поздней весной, другой – осенью. Особенность сезонного цикла  $C_a$  в Черном море, по-видимому, определяется глубиной залегания основного пикноклина, который является нижней границей обитания фи-

топланктона, и увеличением вертикального потока биогенных веществ в зону фотосинтеза в зимний период [2, 5, 8]. Высокое положение основного пикноклина, верхняя граница которого располагается вблизи зоны фотосинтеза, позволяет фитопланктону находиться внутри эвфотического слоя, а поток питательных веществ из более глубоких слоев приводит к быстрому развитию водорослей. В океанических водах умеренных широт основной пикноклин залегает на значительно больших глубинах, чем в Черном море. В результа-

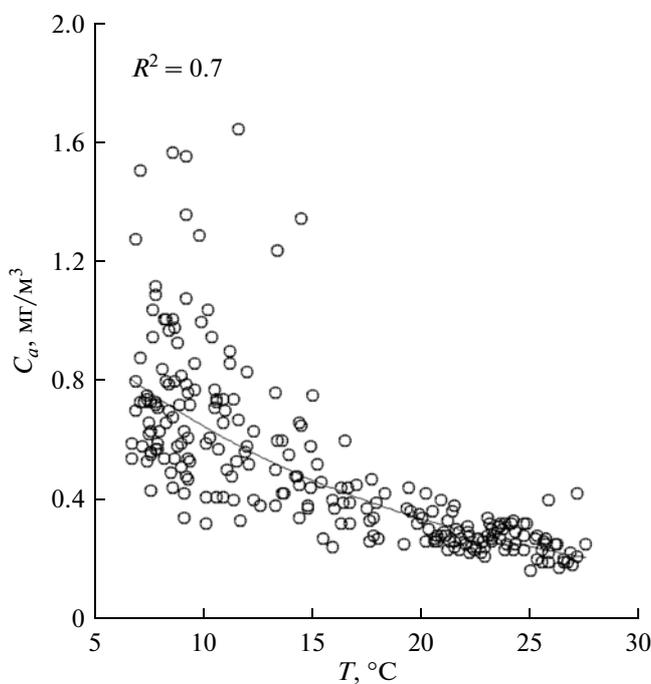


Рис. 7. Связь между концентрацией хлорофилла и температурой воды в поверхностном слое в 1998–2008 гг.

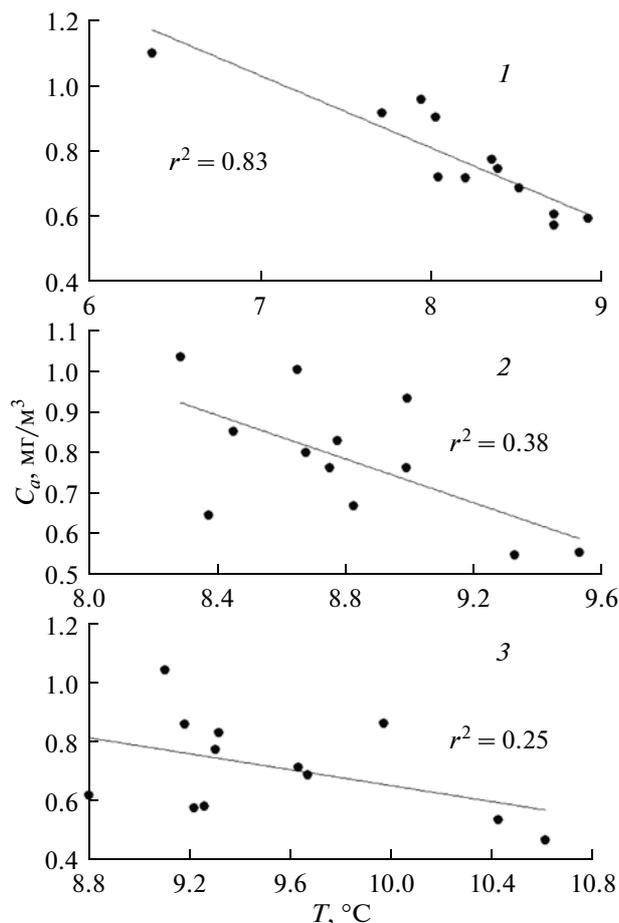


Рис. 8. Зависимость между средними значениями хлорофилла и температуры в холодный период года (декабрь–март), в глубоководной части моря в 1998–2008 гг.

те часть фитопланктона постоянно увлекается турбулентной диффузией ниже зоны фотосинтеза и роста биомассы зимой в поверхностном слое не наблюдается. Из описанного выше механизма следует, что в глубоководных районах Черного моря максимальные величины  $C_a$  и биомассы фитопланктона можно ожидать в годы с суровыми зимами и с активной ветровой деятельностью, как это наблюдалось [12] в холодные зимы в 1986–1992, 1998 и 2003–2004 гг. в центральных областях циклонических круговоротов.

Можно предположить, что интенсивность и продолжительность развития фитопланктона контролируется главным образом облученностью и глубиной перемешиваемого слоя, которая является функцией температуры воды и силы ветра. Однако, как солнечная радиация, так и сила ветра могут значительно различаться на небольших пространственно-временных масштабах, что и приводит к отсутствию связи между  $C_a$  и температурой, осредненными за короткий период времени. В то же время средние значения  $C_a$  за более

длительный промежуток времени (с декабря по март) зависят от средней температуры воды за этот же период: в глубоководной (район 1–3) и прибрежной области (район 4)  $C_a$  повышается с уменьшением температуры, в придунайском районе (5) – между  $C_a$  и температурой наблюдается прямая зависимость. В летний период (июнь–август) изменение  $C_a$  не связано с климатическими флуктуациями температуры.

Авторы благодарят группу NASA/GSFC/OBPG за обработку и распространение спутниковых данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов “Фундаментальные проблемы оперативной океанографии” и “Использование спутниковых данных для биологического мониторинга Черного моря” НАН Украины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берсенева Г.П., Чурилова Т.Я., Георгиева Л.В. Сезонная изменчивость хлорофилла и биомассы фитопланктона в западной части Черного моря // *Океанология*. 2004. Т. 44. № 3. С. 389–398.
2. Ведерников В.И., Демидов А.Б. Долговременная и сезонная изменчивость хлорофилла и первичной продукции в восточных районах Черного моря // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря* / Под. ред. Зацепин А.Г., Флинт М.Ф. М.: Наука, 2002. С. 212–234.
3. Ведерников В.И., Демидов А.Б. Сезонная изменчивость первичной продукции и хлорофилла в открытых районах Черного моря // *Зимнее состояние экосистемы открытой части Черного моря* / Под. ред. Виноградов М.Е. М.: ИО РАН, 1992. С. 71–89.
4. Винберг Г.Г., Муравлева Е.П., Финенко З.З. Некоторые данные по содержанию хлорофилла и первичной продукции в планктоне Черного моря // *Тр. Севастоп. биол. станции*. Киев: Наукова думка, 1964. Т. 17. С. 212–220.
5. Виноградов В.И., Сапожников В.В., Шушкина Э.А. Экосистема Черного моря. М.: Наука, 1992. 112 с.
6. Кропотов С.И., Кривенко О.В. Хлорофилл “а” и продукты его распада в водах Черного моря: сезонная и межгодовая изменчивость // *Журн. общей биологии*. 1999. Т. 60. № 5. С. 556–570.
7. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М. Региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла *a* в Черном море по спутниковым данным SeaWiFS // *Морск. эколог. журн.* 2008. Т. 7. № 2. С. 24–42.
8. Финенко З.З., Крупаткина Д.К. Первичная продукция в Черном море в зимне-весенний период // *Океанология*. 1992. Т. 32. № 1. С. 97–104.
9. Чурилова Т.Я., Ли Р.И., Финенко З.З. Вертикальное распределение хлорофилла и флуоресценции в Черном море // *Морск. эколог. журн.* 2005. Т. 4. № 1. С. 15–45.
10. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V. et al. Bio-optical characteristics of the Barents, White, Black

- and Caspian Seas from data of satellite ocean color scanners. Moscow, 2009. <http://optics.ocean.ru>
11. *Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Yunev O. et al.* Surface chlorophyll in the Black Sea over 1978–1986 derived from satellite and in situ data // *J. Mar. Syst.* 2002. T. 36. Issue 3–4 P. 145–160.
  12. *Oguz T., Joachim W. Dippner, Z. Kaymaz* Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // *J. of Marine Systems.* Istanbul. Turkey. 2006. V 60. P. 235–254.
  13. *Oguz T., Velikova V., Cociasu A., Korchenko A.*, The state of eutrophication in the Black Sea. State of the Environment of the Black Sea (2001–2006/7). Istanbul. Turkey. 2008. P. 83–112.
  14. *Sverdrup H.U.* On conditions for the vernal blooming of phytoplankton // *J. du Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer.* 1953. V. 18. P. 287–295.
  15. *Yunev, O.A., Vedernikov V.I., Basturk O. et al.* Long-term variations of surface chlorophyll *a* and primary production in the open Black Sea // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 230. 2002. P. 11–28.

## Seasonal and Inter-Annual Dynamics of Chlorophyll Concentration in the Black Sea Based on Satellite Observations

Z. Z. Finenko, V. V. Suslin, I. V. Kovaleva

Spatial and temporal variability of chlorophyll concentration (*Chl*) in the sea surface layer in the Black Sea was studied using of SeaWiFS satellite color scanner data from 1998 to 2008. It was revealed that seasonal chlorophyll dynamics in deep water is described with U-like form curve: maximum values were observed in winter-spring and fall periods and minimum ones in summer. By contrast, in the northwestern Black Sea maximum *Chl* was in summer and fall seasons. The inter-annual variability of chlorophyll concentration was observed during the 11-year's period. In the years with severe winters *Chl* in winter-spring time was 3–5 times higher than in the years with warm winters. The inverse relationship between mean *Chl* value and December–March temperature was registered.