

УДК 551.463.8, 551.35, 504.423, 528.855, 581.132, 550.42

## ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ В НАЧАЛЕ ЛЕТА

© 2016 г. М. Д. Кравчишина<sup>1</sup>, А. Ю. Леин<sup>1</sup>, Л. А. Паутова<sup>1</sup>, А. А. Клювиткин<sup>1</sup>,  
Н. В. Политова<sup>1</sup>, А. Н. Новигатский<sup>1</sup>, В. А. Силкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

<sup>2</sup>Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик

e-mail: [kravchishina@ocean.ru](mailto:kravchishina@ocean.ru), [lein@ocean.ru](mailto:lein@ocean.ru), [larisapautova@ocean.ru](mailto:larisapautova@ocean.ru)

Поступила в редакцию 18.03.2015 г.

Обсуждаются особенности вертикального распределения концентрации хлорофилла “а”, взвешенного органического углерода и его изотопного состава, общей взвеси и структуры фитопланктона в Среднем и Южном Каспии в мае–июне 2012 г. Повсеместно обнаружен подповерхностный максимум хлорофилла “а”, положение которого приурочено к глубине залегания сезонного термоклина и обусловлено развитием холодноводного (теневого) фитоценоза. Изучен генезис этого слоя: увеличение концентрации хлорофилла “а” обусловлено либо обилием фитопланктона, либо возрастанием концентрации этого фитопигмента на клетку водоросли. Наиболее высокие значения изученных органических соединений и биомассы фитопланктона выявлены вблизи сезонного термоклина на участке акватории от южной периферии Дербентской впадины к Апшеронскому порогу, что обусловлено топографией дна. Установлено наличие хлорофилла “а” (до  $\geq 1$  мг/м<sup>3</sup>) на глубинах >300 м. Этот факт подкреплен находками отдельных хлорофиллсодержащих клеток водорослей и даже их скоплений в глубинном слое воды. Обсуждаются наиболее вероятные механизмы поступления этих клеток на большие глубины. Вертикальное распределение величин изотопного состава органического углерода, прежде всего, обусловлено вертикальной структурой фитопланктона в водной толще до ~500 м и биогеохимическими процессами на редокс-барьере (горизонт ~600 м). Подтверждается относительная устойчивость хлорофилла “а” и стабильность феофитина “а” в анаэробной среде. Вблизи дна обнаружено значительное количество слабо преобразованного хлорофилла “а”.

DOI: 10.7868/S0030157416050063

### ВВЕДЕНИЕ

Один из основных компонентов морской взвеси — взвешенное органическое вещество (ВОВ): терригенное (аллохтонное “гумусовое”) и биогенное (автохтонное или аквагенное “сапропелевое”). Основной источник органического вещества (ОВ) в Каспийском море — продукция фитопланктона (до 97% от общего годового прихода ОВ в море) [5]. На долю речного стока в общем балансе ОВ приходится всего 2.5%. В водной толще минерализации подвергается 96% годового прихода ОВ и только 4% откладывается в донных осадках. Наиболее достоверно судить о соотношении терригенного и биогенного ОВ в морской взвеси позволяет изотопный состав взвешенного органического углерода (ВОУ) [4, 15, 30].

Одним из важнейших компонентов ВОВ являются фитопигменты. Превращение световой энергии в химическую, в основном, зависит от хлорофилла “а” (хл “а”). Его используют для оценки первичной продукции. Для седиментологии изучение этого фитопигмента не менее актуально: 1) хл “а” и его производные можно рассматривать как маркеры лабильной формы ВОУ в

толще воды и донных осадках [37], где эти пигменты характеризуют вклад именно фитопланктона, а не других источников ОВ; 2) соотношения между концентрацией фитопигментов, взвеси, ВОВ и растворенным органическим веществом (РОВ) являются одними из ключевых характеристик условий седиментации [11]; 3) хл “а” и его производные способны сохраняться в донных осадках (особенно в анаэробных условиях) длительное время, что позволяет использовать их как палеоэкологические биомаркеры продуктивности вод [34]; 4) производные хл “а” — порфирины — обнаружены в нефти, что позволяет решать частные вопросы, связанные с проблемой нефтеобразования [13]. Распределение концентрации хл “а” во взвеси Каспийского моря следует рассматривать как индикатор условий биогенной седиментации [11].

В связи с активной добычей нефти и освоением новых нефтяных месторождений в Каспийском море возникает необходимость новой количественной оценки роли водной взвеси в осадочном процессе. Эти знания необходимы для прогноза возможного ущерба для морской экоси-

стемы в случае техногенной катастрофы в море или на побережье.

Комплексные исследования взвеси и состава ее частиц проводятся авторами в Каспийском море с 2008 г. по настоящее время в разные сезоны [2, 12, 18]. Целью данной работы стало исследование особенностей вертикального распределения биогенной части автохтонной взвеси в Каспийском море в начале лета для познания условий, определяющих процессы биогенной седиментации в аридных и семиаридных бассейнах. Проводилось изучение количественных показателей и вертикальной структуры общей взвеси, ВОУ, хл “а”, фитопланктона, а также выяснение генезиса взвешенных в воде частиц.

### РАЙОН РАБОТ

В Каспийском море сочетаются процессы гумидной и аридной седиментации при значительном влиянии речного взвешенного вещества, поступающего, в основном, со стоком р. Волги и, в меньшей степени, со стоком р. Урала и ряда кавказских рек – Кума, Терек, Сулак, Самур, Кура. В нарушении естественного стока р. Волги особое значение имело завершение строительства нижней плотины у г. Волгограда в 1959 г. Режим работы Волгоградской ГЭС стал причиной непродолжительного и позднего весенне-летнего половодья и, наоборот, увеличения зимнего стока, что впоследствии отрицательно сказалось на всех составляющих экосистемы моря [25]. В том числе, изменился гидрхимический режим и состав фитоценоза. Колебания уровня Каспийского моря и глобальные климатические процессы создают предпосылки для периодической смены условий седиментации в этом бассейне [6, 20, 25]. Каспий претерпевает подъем уровня, начиная с 1978 г. Экосистема моря возвращается к состоянию, характерному для первой трети XX в. [6]. В то время уровень моря был стабильно высокий, а сероводород в Дербентской и Южно-Каспийской впадинах (глубина моря до 788 м и до 1003 м соответственно) обнаруживался постоянно.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В экспедиции Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН с борта НИС “Рифт” (39-й рейс, 21 мая–9 июня 2012 г.) отобраны 132 батометрические (Бт) пробы воды (рис. 1а). Горизонты отбора проб выбирали на основе данных зондирования STD-зондами Idronaut Ocean 316 и SBE19+, оснащенными, в том числе, датчиками интенсивности флуоресценции хл “а” и мутности по нефелометру [2]. На разрезе река–море в Северном Каспии отобрано 8 проб воды по ходу судна с помощью водяного насоса, заглубленного на 1.5 м от поверхности моря в интервале солености воды от 0.23 до 10.2 епс. Наддонные про-

бы воды отобраны с помощью мультикорера (Мк) фирмы KUM (Германия).

Прямые определения концентрации хл “а” и феофитина “а” (фео “а”) (126 проб) проводились флуориметрическим методом (с экстрагированием в 90%-м ацетоне) на флуориметре Trilogy 1.1 (Turner Designs, США) в судовой лаборатории по методике [29]. Калибровка прибора выполнена при помощи стандарта – порошка хл “а” (С6144–1MG “Sigma”, Австрия), в растворе которого начальная концентрация пигмента определена спектрофотометрически. Долю фео “а” (%) определяли от суммы концентраций хл “а” и фео “а”.

Пробы общей взвеси собирали стандартным методом фильтрации под вакуумом 400 мбар с помощью мембранных ядерных фильтров (Ø 47 мм, Ø пор 0.45 мкм). Концентрацию взвеси определяли взвешиванием фильтров с точностью до ±0.001 мг, соотнося с объемом профильтрованной воды. Подробнее о методике в работе [26].

При фиксации, концентрировании и определении количественных показателей фитопланктона использовали стандартные методы [10]. Отношение  $C_{орг}$  фитопланктона к хл “а” ( $C_{орг}$ -Ф/хл “а”) использовалось для выявления генезиса скоплений хл “а”.

Для определения концентрации хл “а”, ВОУ и его изотопного состава ( $\delta^{13}C_{ВОУ}$ ) взвесь фильтровали под вакуумом 200 мбар через стекловолоконные фильтры GF/F фирмы Whatman (предварительно прокаленные при  $t = 450^\circ C$ , Ø фильтра 47 мм, эффективный размер пор 0.7 мкм). Концентрацию ВОУ (101 проба) определяли методом высокотемпературного сжигания с регистрацией выделявшегося  $CO_2$  автоматическим кулонометрическим методом на отечественном анализаторе углерода АН 7529. При концентрации 30–100 мкг С/л точность составляет ±15%, пределы измерений 5–500 мкг С/л. Содержание ВОВ определяли как  $ВОУ \times 2$  [24]. Методы анализа  $\delta^{13}C_{ВОУ}$  (43 пробы) описаны в работах [6, 32].

Данные спутникового сканера цвета моря MODIS-Aqua (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) использованы для расчета концентрации взвеси и хл “а” в поверхностном оптически прозрачном слое [31]. Цветные карты среднемесячных распределений концентрации этих параметров в 2012 г. построены на основе региональных алгоритмов, разработанных в Лаборатории оптики океана ИО РАН с использованием натуральных измерений авторов, и представлены в электронном атласе <http://optics.ocean.ru> [35]:

$M_{SPM} = 67.1b_{bp} + 0.554$ ,  $R^2 = 0.835$ ,  $n = 42$  пары одновременных измерений  $b_{bp}$  (показатель рассеяния назад взвешенными частицами в  $m^{-1}$ ) и натуральных измерений концентрации взвеси,  $M_{SPM}$  – массовая концентрация взвеси (мг/л);

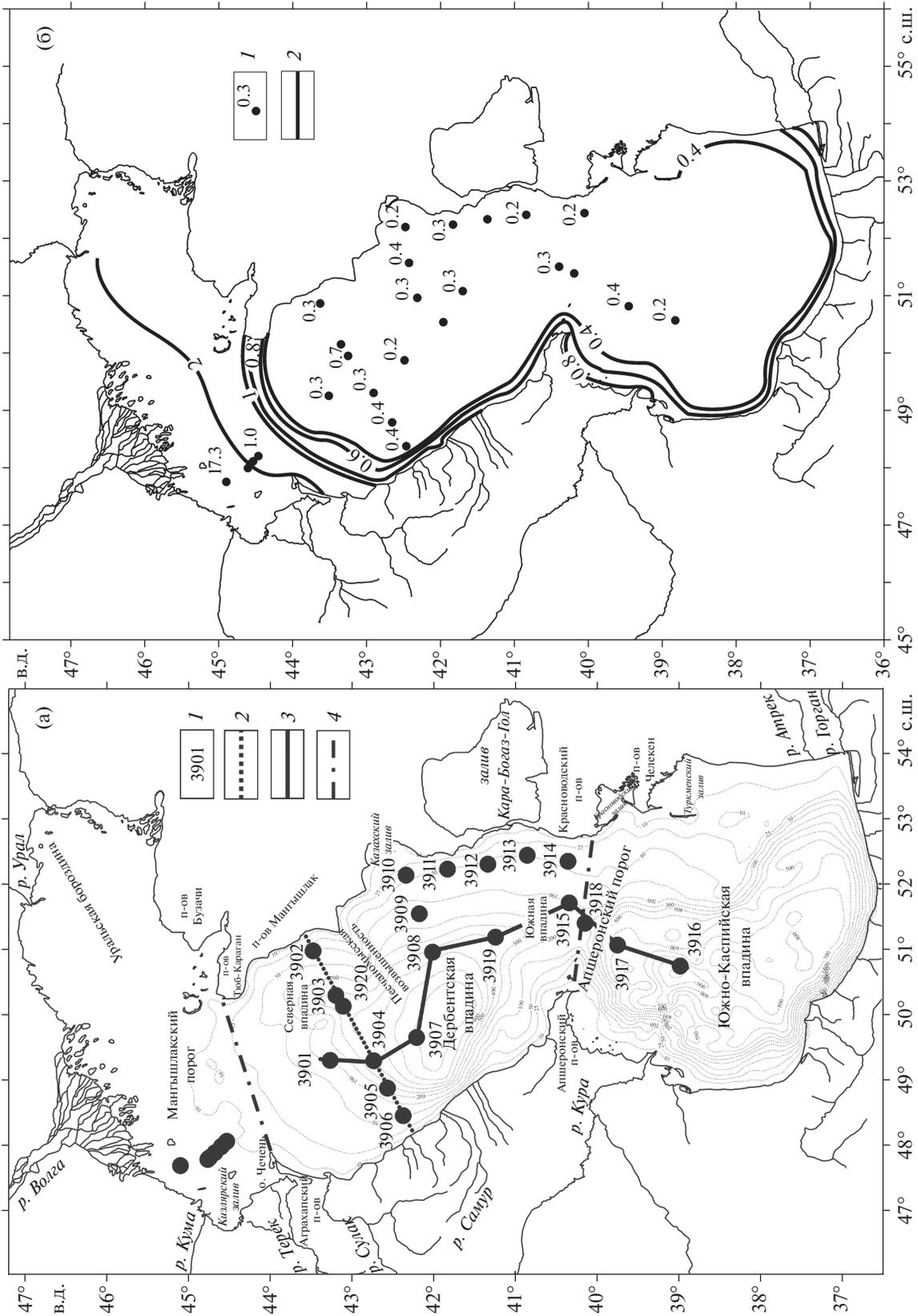


Рис. 1. Картограммы станций отбора пробы (а) и распределения концентрации хл "а" в поверхностном слое воды (б). (а) 1 – номера станций, 2 – поперечный разрез, 3 – осевой транскаспийский разрез, 4 – положение границ, разделяющих Северный, Средний и Южный Каспий; (б) 1 – данные натурных измерений концентрации хл "а" ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) в пробах воды из поверхностного слоя, 2 – изолинии спутниковых (расчетных) данных концентрации хл "а" ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) в оптически прозрачном слое воды по [2, 10]. Изолинии нанесены согласно карте среднемесячного распределения концентрации хл "а" в июне 2012 г. по данным спутникового сканера цвета MODIS-Aqua (см. электронный атлас <http://orbits.occas.ru>).

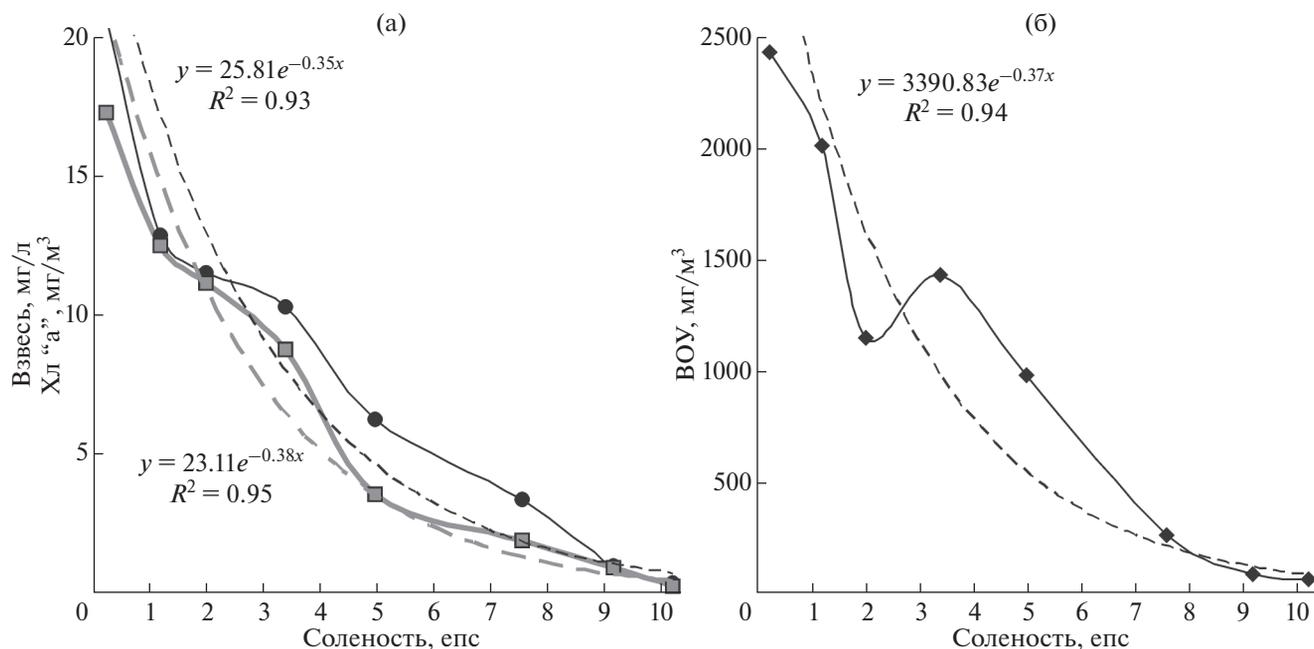


Рис. 2. Распределение хл "а", взвеси (а) и БОУ (б) в области МФ дельта Волги – Северный Каспий в зависимости от солености воды: сплошная линия – дифференциальная кривая распределения, пунктирная – линия тренда экспоненциальной зависимости; черным цветом показана взвесь, серым цветом – хл "а".

$Chla = 0.573(R_{rs}(488)/R_{rs}(551))^{-2.39}$ ,  $R^2 = 0.638$ ,  $n = 55$  пар одновременных измерений значения коэффициента яркости моря ( $R_{rs}$ ) для спектральных каналов 488 и 551 нм и натурных измерений концентрации хл "а",  $Chla$  – концентрация хл "а" (мкг/л).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Мощность верхнего перемешанного слоя (ВПС) определяется интенсивностью прогрева. Водная толща Среднего и Южного Каспия по всем изученным параметрам делилась на три зоны: 1) ВПС ~0–15 м ( $t$  от +17°C на ст. 3901 до +23°C на ст. 3916); 2) область сезонного термоклина, включающая над- и подтермоклинный слой (~20–60 м,  $t$  до +8°C под термоклином); 3) глубинный водный слой от ~40–60 м до дна ( $t$  около +6°C), включающий нередко придонный нефелоидный слой. Соленость в ВПС составляла 11.23 епс, а в слое скачка увеличивалась до 11.42 епс. В глубоководной части моря температура и соленость воды соответствовали многолетним данным характерным для начала лета [3].

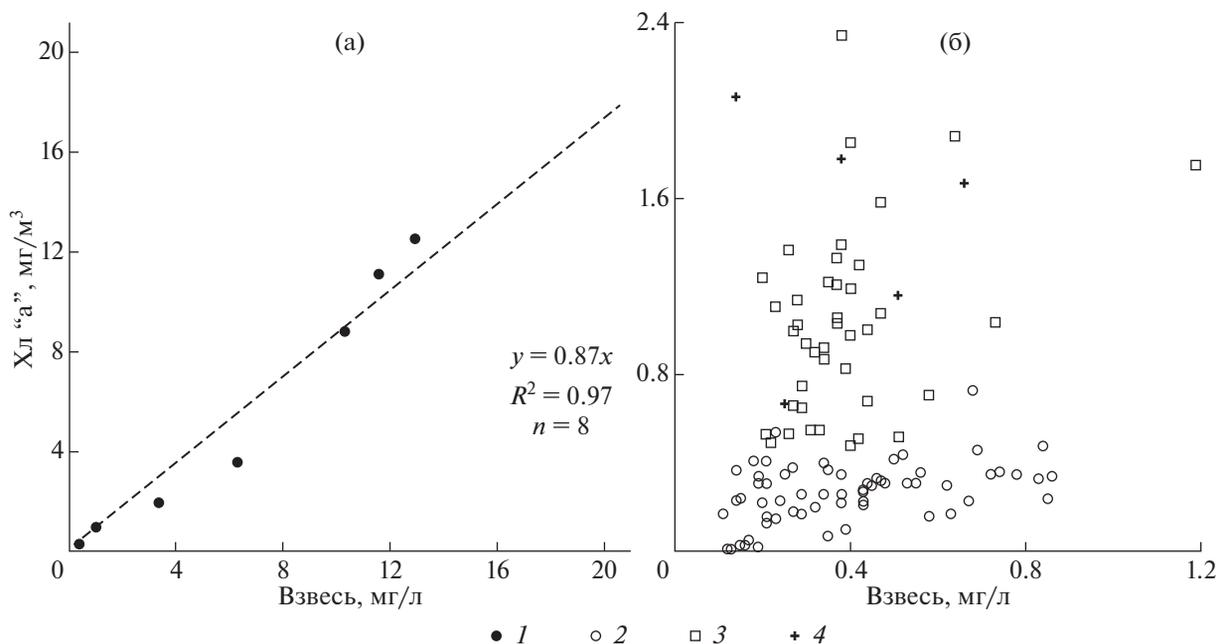
### Поверхностный слой

**Концентрация взвеси.** В период исследований (третья декада мая) максимальные значения всех изученных параметров взвеси характерны для зоны смешения река Волга – Северный Каспий. Эта область хорошо видна на спутниковых изображениях распределения концентрации взвеси,

хл "а" и показателя поглощения желтым веществом (см. электронный атлас <http://optics.ocean.ru>).

В области маргинального фильтра (МФ) дельта Волги – Северный Каспий по мере увеличения солености воды концентрация взвеси уменьшалась по экспоненте (рис. 2а). Уже при солености воды ~1 епс концентрация взвеси на первой (гравитационной) ступени МФ уменьшалась в ~2 раза. В интервале солености ~3–8 епс выделяется коагуляционно-сорбционная ступень МФ [17]. На этой ступени идут физико-химические и биогеохимические процессы преобразования вещества, что отражается на графике зависимости концентрации взвеси от солености всплеском кривой распределения на фоне общего экспоненциального тренда (рис. 2а). Мористее (соленость  $\geq 9$  епс) выделяется биологическая ступень МФ [17]. Эти границы несколько условны, постепенны и привязаны к солености воды зоны смешения река–море. В целом, в пределах изученного диапазона солености (0.23–10.20 епс) концентрация взвеси уменьшалась ступенчато в 48 раз в направлении река → море. Только ~2–5% аллохтонной взвеси от исходной величины поступало в Средний Каспий после прохождения области МФ.

Концентрация взвеси в ВПС Среднего и Южного Каспия не превышала 1 мг/л. Наиболее низкие величины (до 0.27 мг/л) установлены в Казахском заливе (ст. 3910) и Дербентской впадине (ст. 3907).



**Рис. 3.** Взаимосвязь взвеси и хл “а” в области МФ дельта Волги – Северный Каспий (а) и в Среднем и Южном Каспии (б): 1 – пробы из области МФ; 2 – пробы из водной толщи Среднего и Южного Каспия, исключая область термоклина; 3 – пробы из слоя термоклина; 4 – пробы из придонных и глубинных горизонтов с повышенной концентрацией хл “а”.

**Концентрация хл “а”** в области МФ распределяется синфазно с концентрацией взвеси. Между этими параметрами установлена надежная линейная зависимость (рис. 3а). В период спада половодья на р. Волге можно предполагать вспышку развития (“цветение”) диатомовых водорослей [12].

В интервале солености воды 0–8 епс концентрация хл “а” составляла 19–2 мг/м<sup>3</sup> соответственно. Согласно спутниковым снимкам Северный Каспий выделяется высокой концентрацией хл “а” практически во все сезоны. Уже при солености 9–12 епс его концентрация не превышала 1 мг/м<sup>3</sup>.

Концентрация хл “а” в ВПС Среднего и Южного Каспия варьировала от 0.16 до 0.73 мг/м<sup>3</sup>, составляя в среднем 0.31 мг/м<sup>3</sup> (n = 30). Максимальная концентрация наблюдалась на ст. 3920 (Северная впадина). Доля фео “а” составила 20–40%, то есть в хлоропластах клеток содержался фотосинтетический активный хл “а”. Доля концентрации хл “а” от концентрации ВОВ составила 0.2–0.4% (таблица). В пределах ВПС резких фронтов по интенсивности флуоресценции хл “а” и РОВ в Среднем и Южном Каспии зарегистрировано не было [2].

На среднемесячных спутниковых изображениях (май и июнь 2012 г.) повышенные концентрации хл “а” отмечались не только в Северном Каспии, но и вблизи западного побережья Среднего Каспия. Формирование этой узкой вдольбереговой зоны, вероятно, стало следствием обога-

щения прибрежной воды биогенными элементами, поставляемыми с речным стоком кавказских рек.

Низкие концентрации хл “а” в ВПС, очевидно, обусловлены рядом абиотических факторов: недостаток минеральных форм азота и фосфора, необходимых клеткам фитопланктона для синтеза аминокислот, нуклеиновых кислот и т.п.; адаптация фитопланктона, живущего вблизи поверхности, к высоким интенсивностям света; опосредованно, степень прогрева воды. В работе Сапожникова и др. [25] сообщалось, что последние 70 лет в гидрохимическом режиме Каспийского моря обнаружилась тенденция дефицита минеральных форм биогенных элементов в фотическом слое и, наоборот, избытка там аммония, мочевины и органических форм фосфора и азота.

**Концентрация и состав фитопланктона.** Основу фитопланктона в период спада весеннего половодья в устьевой области р. Волги и Северного Каспия составляли мелкие центрические диатомеи родов *Cyclotella*, *Stephanodiscus* и *Thalassiosira* [12].

Видовой состав фитопланктона в мае–июне 2012 г. в Среднем и Южном Каспии был типично морским с незначительными элементами опреснения и характеризовался высокой степенью сходства в пределах глубоководных впадин. Среди морских форм преобладали диатомовые и динофлагелляты, для которых характерно большое видовое разнообразие [21]. Солонатоводные виды не превышали 10% (в основном, цианобактерии); пресноводные формы составляли 11% от

Количественные показатели взвеси, фитопланктона и взвешенных форм изученных органических соединений в водной толще Каспийского моря. 39-й рейс НИС "Рифт", 22 мая–9 июня 2012 г.

№ станции	Координаты		Глубина, м	Горизонт, м/см	Орудие отбора	Взвесь, мг/л	Хл "а"		Фео "а", %	Фитопланктон			C <sub>орг</sub> -Ф/ /хл "а"	ВОУ		δ <sup>13</sup> С <sub>ВОУ</sub> , ‰
	с.ш.	в.д.					мг/м <sup>3</sup>	%ВОВ		10 <sup>3</sup> кл/л	мг/м <sup>3</sup>	мгС/м <sup>3</sup>		мг/м <sup>3</sup>	%	
МФ-1	45°05.52'	47°41.14'	—	0	Насос	20.71	17.33	0.4	31.6				2440	11.8		
МФ-2	44°45.46'	47°46.92'	—	0	Насос	12.91	12.53	0.3	36.5				2016	15.6		
МФ-3	44°44.98'	47°47.50'	—	0	Насос	11.59	11.18	0.5	29.5				1152	9.9		
МФ-4	44°44.26'	47°48.33'	—	0	Насос	10.33	8.78	0.3	33.3				1432	13.9		
МФ-5	44°40.17'	47°53.06'	—	0	Насос	6.30	3.58	0.2	36.9				980	15.6		
МФ-6	44°35.70'	47°58.46'	—	0	Насос	3.41	1.96	0.4	22.1				259	7.6		
МФ-7	44°31.93'	48°03.03'	—	0	Насос	1.05	0.97	0.6	24.8				86	8.2		
3901	43°15.71'	49°17.79'	110	0	Бт	0.43	0.28	0.2	34.5	3277	418	16.6	63	14.7		
3901	43°15.71'	49°17.79'	110	10	Бт	0.47	0.32	0.2	36.1	2191	380	12.6	64	13.7		
3901	43°15.71'	49°17.79'	110	27	Бт	0.3	0.94	0.7	42.6	1980	246	8.2	63	21.0	-24.88	
3901	43°15.71'	49°17.79'	110	40	Бт	0.28	1.14	7.0	32.6	1364	129	3.9	8.1	2.9		
3901	43°15.71'	49°17.79'	110	60	Бт	0.21	0.41		33.3	2138	257	16.7				
3901	43°15.71'	49°17.79'	110	90	Бт	0.25	0.67	3.4	33.5	757	402	27.2	9.8	3.9		
3901	43°15.71'	49°17.79'	110	103	Бт	0.51	1.16	31.9	30.4	384	97	6.1	1.8	0.4	-24.17	
3902	43°28.09'	49°58.38'	57	0	Бт	0.46	0.33	0.4	22.0	334	58	2.8	47	10.2		
3902	43°28.09'	49°58.38'	57	9	Бт	0.74	0.36	0.3	26.6	1026	173	6.9	66	8.9		
3902	43°28.09'	49°58.38'	57	14	Бт	0.52	0.44	0.9	25.5	711	186	9.6	25	4.8		
3902	43°28.09'	49°58.38'	57	21	Бт	0.34	0.40	0.4	26.7	236	73	5.0	48	14.2	-25.60	
3902	43°28.09'	49°58.38'	57	28	Бт	0.31	0.55		40.4	342	85	5.1				
3902	43°28.09'	49°58.38'	57	35	Бт	0.37	1.21	1.2	39.9	149	68	3.6	52	14.1		
3902	43°28.09'	49°58.38'	57	55	Бт	0.47	1.58	2.1	38.8	173	36	2.6	38	8.1	-27.77	
3904	42°43.62'	49°17.32'	417	0	Бт	0.48	0.31	0.7	31.3	828	101	2.9	22	4.5		
3904	42°43.62'	49°17.32'	417	10	Бт	0.78	0.35	0.6	34.2	1003	134	6.1	30	3.8		
3904	42°43.62'	49°17.32'	417	30	Бт	0.27	0.66	1.6	38.3	81	23	1.0	20	7.5		
3904	42°43.62'	49°17.32'	417	45	Бт	0.27	1.00	1.4	30.1	681	36	1.9	35	12.9	-24.35	
3904	42°43.62'	49°17.32'	417	100	Бт	0.19	0.34	4.9	30.3	105	16	0.8	3.4	1.8		
3904	42°43.62'	49°17.32'	417	320	Бт	0.23	0.54	9.8	31.6	30	13	0.5	2.8	1.2		
3904	42°43.62'	49°17.32'	417	424	Бт	0.66	1.67	1.6	31.4	540	45	3.2	51	7.8	-22.75	
3904	42°43.65'	49°17.46'	430	0–30	Мк	19.40	77.63	3.2	22.7				1200	6.2	-23.36	
3905	42°33.70'	48°52.00'	300	0	Бт	0.35	0.37	0.4	23.8	433	111	4.2	46	13.0		
3905	42°33.70'	48°52.00'	300	20	Бт	0.42	0.51	0.6	30.2	831	99	5.2	42	10.1		

Таблица. Продолжение

№ станции	Координаты		Глубина, м	Горизонт, м/см	Орудие отбора	Взвесь, мг/л	Хл "а"		Фео "а", %	Фитопланктон			Сорг-Ф/хл "а"	ВОУ		δ <sup>13</sup> С <sub>ВОУ</sub> , ‰
	с.ш.	в.д.					мг/м <sup>3</sup>	%ВОВ		10 <sup>3</sup> кл/л	мг/м <sup>3</sup>	мгС/м <sup>3</sup>		мг/м <sup>3</sup>	%	
3905	42°33.70'	48°52.00'	300	37	Бт	0.23	1.11	1.9	26.8	824	64	3.3	2.9	30	12.9	-24.14
3905	42°33.70'	48°52.00'	300	60	Бт	0.26	0.53	2.4	21.6	68	9	0.6	1.2	11.1	4.3	
3905	42°33.70'	48°52.00'	300	140	Бт	0.14	0.23		47.9	33	5	0.2	0.9			
3905	42°33.70'	48°52.00'	300	180	Бт	0.24	0.23		37.6	57	4	0.2	0.8			
3905	42°33.70'	48°52.00'	300	295	Бт	0.38	1.78	9.6	22.7	408	53	3.4	1.9	9.3	2.5	-24.23
3906	42°22.25'	48°27.09'	55	0	Бт	0.56	0.36	0.4	22.6	95	76	4.6	12.9	43	7.8	
3906	42°22.25'	48°27.09'	55	16	Бт	0.29	0.26	0.2	32.5	522	63	4.2	16.2	58	19.9	
3906	42°22.25'	48°27.09'	55	28	Бт	0.32	0.90	1.3	37.9	979	79	5.4	6.0	34	10.8	-25.41
3906	42°22.25'	48°27.09'	55	55	Бт	0.34	0.87	1.1	38.7	259	54	2.3	2.6	40	11.7	-24.37
3907	42°12.08'	49°38.84'	725	0	Бт	0.32	0.20	0.5	23.9	252	184	5.6	28.1	19	6.0	-25.73
3907	42°12.08'	49°38.84'	725	14	Бт	0.43	0.27	0.6	24.9	842	143	5.9	21.9	22	5.1	
3907	42°12.08'	49°38.84'	725	39	Бт	0.29	0.75	3.9	39.0	1211	42	2.8	3.8	9.7	3.3	-25.18
3907	42°12.08'	49°38.84'	725	80	Бт	0.23	0.15	7.3	47.6	103	21	1.6	10.9	1.0	0.4	
3907	42°12.08'	49°38.84'	725	160	Бт	0.15	0.24		46.7	55	3	0.1	0.4			-29.93
3907	42°12.08'	49°38.84'	725	500	Бт	0.15	0.03		41.3	336	3	0.1	3.7			-29.24
3907	42°12.08'	49°38.84'	725	640	Бт	0.21	0.31		27.2							
3907	42°12.08'	49°38.84'	725	660	Бт	0.35	0.07		37.8							
3907	42°12.08'	49°38.84'	725	680	Бт		0.04		49.2							
3907	42°12.08'	49°38.84'	725	700	Бт		0.24		29.7							
3907	42°12.08'	49°38.84'	725	710	Бт		0.16		28.8							
3907	42°12.08'	49°38.84'	725	715	Бт	0.38	0.22	0.8	20.6					13	3.5	-24.94
3907	42°11.86'	49°38.32'	725	0-10	Мк	16.91	58.73	7.7	23.2					383	2.3	-23.79
3908	42°02.46'	50°58.44'	425	0	Бт	0.83	0.33	0.2	19.4	817	19	1.1	3.3	70	8.4	
3908	42°02.46'	50°58.44'	425	8	Бт	0.45	0.30	0.2	29.6	2282	54	3.3	11.1	78	17.4	
3908	42°02.46'	50°58.44'	425	20	Бт	0.53	0.31	0.4	34.7	105	88	5.8	18.9	39	7.4	
3908	42°02.46'	50°58.44'	425	40	Бт	0.37	1.03	7.9	41.9	1312	45	2.1	2.0	6.6	1.8	-24.93
3908	42°02.46'	50°58.44'	425	100	Бт	0.19	0.31	15.0	28.0	251	37	2.8	8.9	1.0	0.5	
3908	42°02.46'	50°58.44'	425	262	Бт	0.20	0.22		41.6	216	12	0.3	1.5			
3908	42°02.46'	50°58.44'	425	400	Бт	0.27	0.38		30.7							
3908	42°02.46'	50°58.44'	425	0-10	Мк	13.00	65.66	4.9	18.4	1777	55	2.0	5.6	664	5.1	-23.84
3909	42°10.71'	51°32.48'	147	0	Бт	0.72	0.35	0.2	18.3	78	14	0.5	1.6	72	10.0	-22.21
3909	42°10.71'	51°32.48'	147	9	Бт	0.55	0.31	0.3	19.0					59	10.8	

Таблица. Продолжение

№ станции	Координаты		Глубина, м	Горизонт, м/см	Орудие отбора	Взвесь, мг/л	Хл "а"		Фео "а", %	Фитопланктон			Сорг-Ф/хл "а"	ВОУ		$\delta^{13}\text{C}_{\text{ВОУ}}$ , ‰
	с.ш.	в.д.					мг/м <sup>3</sup>	%ВОВ		10 <sup>3</sup> кл/л	мг/м <sup>3</sup>	мгС/м <sup>3</sup>		мг/м <sup>3</sup>	%	
3909	42°10.71'	51°32.48'	147	25	Бт	0.51	0.52	0.6	32.9	850	149	9.9	19.1	45	8.9	-24.43
3909	42°10.71'	51°32.48'	147	36	Бт	0.37	1.06	1.6	30.4	1160	82	5.1	4.8	34	9.2	-24.43
3909	42°10.71'	51°32.48'	147	61	Бт	0.22	0.49	14.2	19.5	488	21	1.0	2.1	1.7	0.8	
3909	42°10.71'	51°32.48'	147	100	Бт	0.14	0.37		22.4	80	30	1.5	4.0		0.1	
3909	42°10.71'	51°32.48'	147	132	Бт	0.34	0.26	37.7	45.8					0.3		-23.18
3909	42°10.71'	51°32.48'	147	141	Бт	0.50	0.42		42.9							
3910	42°20.01'	52°08.15'	42	0	Бт	0.27	0.18	0.2	25.4	2584	52	4.5	24.9	38	13.9	
3910	42°20.01'	52°08.15'	42	13	Бт	0.58	0.16	0.2	31.0					32	5.6	
3910	42°20.01'	52°08.15'	42	25	Бт	0.40	1.19	3.8	29.1	144	751	72.0	60.5	16	3.9	-24.52
3910	42°20.01'	52°08.15'	42	38	Бт	0.40	0.98	4.9	32.2	96	185	13.6	13.8	10	2.5	-22.98
3911	41°49.46'	52°07.92'	67.2	0	Бт	0.38	0.26	0.2	22.6					58	15.2	
3911	41°49.46'	52°07.92'	67.2	13	Бт		0.22		35.3					45	13.6	-24.32
3911	41°49.46'	52°07.92'	67.2	25	Бт	0.33	0.55	0.6	32.4					6.6	1.4	-24.32
3911	41°49.46'	52°07.92'	67.2	39	Бт	0.47	1.08	8.2	28.0					0.7	0.2	-21.90
3911	41°49.46'	52°07.92'	67.2	64	Бт	0.40	0.48	34.8	36.0					30	4.5	
3913	40°51.03'	52°26.24'	49	0	Бт	0.67	0.23	0.4	22.6					39	8.8	
3913	40°51.03'	52°26.24'	49	11	Бт	0.44	0.31	0.4	22.6					31	14.6	
3913	40°51.03'	52°26.24'	49	25	Бт	0.21	0.53	0.9	25.6					9	2.7	-23.39
3913	40°51.03'	52°26.24'	49	37	Бт	0.35	1.22	6.6	23.8					9	2.4	-22.52
3913	40°51.03'	52°26.24'	49	49	Бт	0.39	0.83	4.5	26.8					21	3.3	
3914	40°21.16'	52°20.64'	46	0	Бт	0.63	0.17	0.4	30.5	3553	78	8.0	46.8	21	3.3	
3914	40°21.16'	52°20.64'	46	8	Бт	0.43	0.21	0.3	26.1	100	102	9.0	43.0	36	8.4	
3914	40°21.16'	52°20.64'	46	30	Бт	1.19	1.75	1.2	25.3	2035	605	63.7	36.4	70	5.9	-23.24
3914	40°21.16'	52°20.64'	46	41	Бт	0.44	1.01	6.1	36.9	235	88	6.9	6.9	8.3	1.9	-24.67
3915	40°20.69'	51°42.38'	99	0	Бт	0.86	0.34	0.3	19.9	567	74	7.4	21.6	54	6.3	
3915	40°20.69'	51°42.38'	99	11	Бт	0.69	0.46	0.3	17.7	168	434	46.8	101.7	66	9.6	
3915	40°20.69'	51°42.38'	99	23	Бт	0.34	0.92	0.5	27.4	1094	2647	249.2	270.9	100	29.3	
3915	40°20.69'	51°42.38'	99	40	Бт	0.64	1.88	3.4	29.1	722	371	26.8	14.3	28	4.3	-23.26
3915	40°20.69'	51°42.38'	99	56	Бт	0.38	1.39	6.3	22.1	834	143	10.0	7.2	11	2.9	
3915	40°20.69'	51°42.38'	99	99	Бт	0.29	0.17	2.7	49.0	822	77	2.9	16.8	3.1	1.1	-23.31
3916	38°58.84'	50°44.44'	1003	0	Бт	0.85	0.24	0.2	27.8	4898	241	25.4	105.7	58	6.8	-23.73
3916	38°58.84'	50°44.44'	1003	15	Бт	0.84	0.48	0.3	27.4	1986	334	35.1	73.2	90	10.8	
3916	38°58.84'	50°44.44'	1003	37	Бт	0.26	1.37	1.9	32.0	1300	230	8.9	6.5	37	14.1	-22.36

Таблица. Окончание

№ станции	Координаты		Глубина, м	Горизонт, м/см	Орудие отбора	Взвесь, мг/л	Хл "а"		Фео "а", %	Фитопланктон			C <sub>орг-Ф</sub> /Хл "а"		ВОУ		δ <sup>13</sup> С <sub>воу</sub> , ‰
	с.ш.	в.д.					мг/м <sup>3</sup>	%ВОВ		10 <sup>3</sup> кл/л	мг/м <sup>3</sup>	мгС/м <sup>3</sup>	мг/м <sup>3</sup>	мг/м <sup>3</sup>	%		
3916	38°58.84'	50°44.44'	1003	53	Бт	0.28	1.03	1.8	30.3	3132	567	32.8	31.9	28	10.1		
3916	38°58.84'	50°44.44'	1003	126	Бт	0.21	0.13		30.3	510	170	17.1	131.7				
3916	38°58.84'	50°44.44'	1003	300	Бт	0.16	0.03		48.0	81	4	0.1	4.6				
3916	38°58.84'	50°44.44'	1003	500	Бт	0.12	0.01		69.5	556	8	0.4	43.7				
3916	38°58.84'	50°44.44'	1003	1000	Бт	0.19	0.02		55.3				0.0			-26.67	
3916	39°00.77'	50°42.81'	1003	0-20	Мк	13.70	24.84	1.0	38.1				0.0	1192	8.7	-18.60	
3917	39°43.72'	51°05.71'	665	0	Бт	0.38	0.35		21.8	1038	187	19.8	56.5			-23.16	
3917	39°43.72'	51°05.71'	665	16	Бт	0.73	1.04	0.4	23.1	852	147	15.7	15.1	141	19.3		
3917	39°43.72'	51°05.71'	665	25	Бт	0.58	0.71	0.6	25.8	591	404	39.6	55.7	62	10.6		
3917	39°43.72'	51°05.71'	665	43	Бт	0.37	1.33	2.0	26.9	175	159	8.5	6.4	33	8.9	-23.01	
3917	39°43.72'	51°05.71'	665	100	Бт	0.21	0.16	4.6	35.1	244	2	0.2	3.7	1.7	0.8		
3917	39°43.72'	51°05.71'	665	280	Бт	0.17	0.05		50.1				0.0			-26.08	
3917	39°43.72'	51°05.71'	665	661	Бт	0.13	0.01		57.2				0.0	949	8.0	-21.56	
3917	39°43.72'	51°05.71'	665	0-20	Мк	11.87	18.31	1.0	30.7	4093	259	21.6	72.0	96	15.5		
3919	41°15.27'	51°10.90'	420	0	Бт	0.62	0.30	0.2	23.7	6561	1300	126.8	186.5	131	29.8		
3919	41°15.27'	51°10.90'	420	14	Бт	0.44	0.68	0.3	17.4	1487	424	19.0	8.1	42	11.0	-23.27	
3919	41°15.27'	51°10.90'	420	43	Бт	0.38	2.34	2.8	20.9	997	561	50.1	27.1	105	26.2		
3919	41°15.27'	51°10.90'	420	55	Бт	0.40	1.85	0.9	24.7	1777	278	23.5	57.2	3.4	1.9		
3919	41°15.27'	51°10.90'	420	100	Бт	0.18	0.41	5.9	27.7								
3919	41°15.27'	51°10.90'	420	250	Бт	0.14	2.06		30.0								
3919	41°15.27'	51°10.90'	420	418	Бт	0.39	0.10	0.3	48.9					19	4.9	-22.72	
3919	41°15.27'	51°10.90'	420	0-20	Мк	17.83	65.85	2.3	29.0					1456	8.2	-22.43	
3920	43°06.61'	50°08.20'	386	0	Бт	0.68	0.73	0.3	19.5	997	85	3.0	4.1	112	16.5		
3920	43°06.61'	50°08.20'	386	9	Бт	0.29	0.65	0.3	23.5	726	163	6.1	9.4	97	33.4		
3920	43°06.61'	50°08.20'	386	30	Бт	0.20	1.24	1.6	33.3	2921	143	7.2	5.8	40	19.8		
3920	43°06.61'	50°08.20'	386	39	Бт	0.42	1.30	9.0	28.8	1597	551	21.1	16.2	7.2	1.7	-25.15	
3920	43°06.61'	50°08.20'	386	80	Бт	0.43	0.23	2.1	30.3	553	18	1.0	4.5	5.5	1.3		
3920	43°06.61'	50°08.20'	386	300	Бт	0.11	0.17		40.1	1013	16	0.6	3.7	7.9	3.2	-23.37	
3920	43°06.61'	50°08.20'	386	377	Бт	0.25	0.35	2.2	34.8	668	88	5.8	16.6	1060	6.8	-22.95	
3920	43°06.61'	50°08.20'	386	0-20	Мк	15.63	57.96	2.7	33.8								

общего числа видов (диатомовые, зеленые и цианобактерии).

Биомасса фитопланктона поверхностного горизонта Среднего и Южного Каспия варьировала от 1.1 до 25.4 мгС/м<sup>3</sup> (таблица). Наиболее высокие величины (16–25 мгС/м<sup>3</sup>) установлены на северном склоне и южной периферии Дербентской впадины (ст. 3901 – 75% от общей биомассы составляют диатомовые, ст. 3919 – 97% динофлагелляты и мелкие флагелляты), а также в Южно-Каспийской впадине (станции 3916, 3917 – 90–92% динофлагелляты).

Отношение между  $C_{\text{орг}}$  фитопланктона и хл “а” ( $C_{\text{орг}}\text{-Ф/хл “а”}$ ) в ВПС подвержено вариабельности: от 1.6 до 186. Это связано, прежде всего, с адаптационным откликом фитопланктона на условия среды и, возможно, с генотипическими различиями этого показателя у разных групп водорослей. При сходных концентрациях хл “а” отношение клеточного  $C_{\text{орг}}$  к хл “а” различалось в несколько раз. Наибольшие величины (от 60 до >100) наблюдались в южной части осевого разреза (ст. 3919 → ст. 3916).

Общая численность фитопланктона достигала максимальной величины на ст. 3916 –  $4.9 \times 10^6$  кл/л за счет фракции пикопланктона 1–2 мкм (98% от общей численности). Концентрация хл “а” здесь была низкой 0.2–0.3 мг/м<sup>3</sup>.

Доминирующие виды тепловодного (светового) сообщества в ВПС должны иметь необходимые адаптивные механизмы: либо низкие требования к концентрациям биогенных элементов (мелкоклеточные формы) и способность физиологической адаптации к высоким интенсивностям света, либо возможности накапливать питательные вещества внутри клетки на несколько последующих делений (крупноклеточные формы) [21].

**Концентрация ВОУ.** Наибольшие концентрации ВОУ установлены в пределах МФ дельта Волги – Северный Каспий, которые уменьшались по мере роста солёности воды (0.23–10.20 епс) синфазно с концентрацией взвеси: от 2440 до 63 мг/м<sup>3</sup> соответственно (таблица). Установлено неконсервативное поведение ВОУ и взвеси в зоне смешения пресной и солёной воды: рост их концентрации отмечался в пределах коагуляционно-сорбционной ступени МФ в интервале солёности ~3–8 епс (рис. 26). После прохождения области МФ только ~3% аллохтонного ВОУ (от исходной величины) поступало в Средний Каспий.

В Среднем и Южном Каспии концентрация ВОУ в поверхностном слое составляла ≤100 мкг/л. Содержание ВОУ во взвеси поверхностного слоя не превышало 15%. Наиболее низкие значения (≤6%) наблюдались у восточного побережья Среднего Каспия (вблизи п-ва Мангышлак). Агатовой и др. [1] было показано, что для экосистемы Северного Каспия в балансе ВОУ определяющим

является сток р. Волги, тогда как для экосистем Среднего и Южного Каспия – интенсивность биологических процессов (автотрофных и гетеротрофных).

**Изотопный состав ВОУ.** Установлены основные источники формирования изотопного состава ВОУ Каспийского моря: автохтонное ОВ – фитопланктон; аллохтонное ОВ – взвешенный речной сток и эоловый материал, в составе которых могут обнаруживаться остатки высшей растительности гумидной и аридной зон [32]. В Северном Каспии преобладает аллохтонный ВОУ речного генезиса [15]. Влияние этого вещества сказывается на составе ВОУ поверхностного горизонта Дербентской впадины, где значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ВОУ}}$  в начале лета 2012 г. составляли –25...–26‰. У восточного побережья Среднего Каспия состав ВОУ был изотопно-тяжелее (–23.6‰), чем в его глубоководной части. Утяжеление состава ВОУ происходило, вероятно, за счет примеси ОВ степной, пустынной и полупустынной растительности, поступающей в составе аэрозольного материала. В поверхностном горизонте Южно-Каспийской впадины значение  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ВОУ}}$  составляло примерно –23‰, то есть было изотопно-тяжелее ВОУ Дербентской впадины. Такое значение  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ВОУ}}$  характерно для морских водоемов с малым речным стоком [32].

### Водная толща

**Концентрация взвеси.** Наибольшие концентрации взвеси в начале лета были приурочены непосредственно к ВПС – до 0.9 мг/л, что обусловлено, вероятно, поступлением аллохтонного взвешенного вещества: преимущественно речного генезиса в Среднем Каспии и преимущественно эолового – в Южном. С глубиной (до 50–60 м) концентрация взвеси уменьшалась до ~0.3 мг/л. На осевом субмеридиональном разрезе мощность слоя повышенных концентраций взвеси увеличивалась по мере приближения к Апшеронскому порогу (ст. 3919 и южнее, рис. 4). В работе Лебедева [16] сообщалось, что в Среднем Каспии основная масса обломочного материала откладывается в его южной части, то есть там, где материковый склон меняет свое простирание на субширотное (севернее Апшеронского полуострова и в Южной впадине). Именно здесь установлены высокие скорости осадконакопления >200 см за тысячу лет [16] и высокие вертикальные потоки вещества от >500 до >2000 мг/м<sup>2</sup>/сут на горизонтах 100 и 300–400 м соответственно [19]. В придонном горизонте этой зоны формируется нефелоидный слой (до ~0.4 мг/л). Таким образом, распределение концентрации взвеси в южной части Среднего Каспия контролируется, прежде всего, топографией дна.

Нефелоидные слои – достаточно распространенное явление для районов моря с глубинами

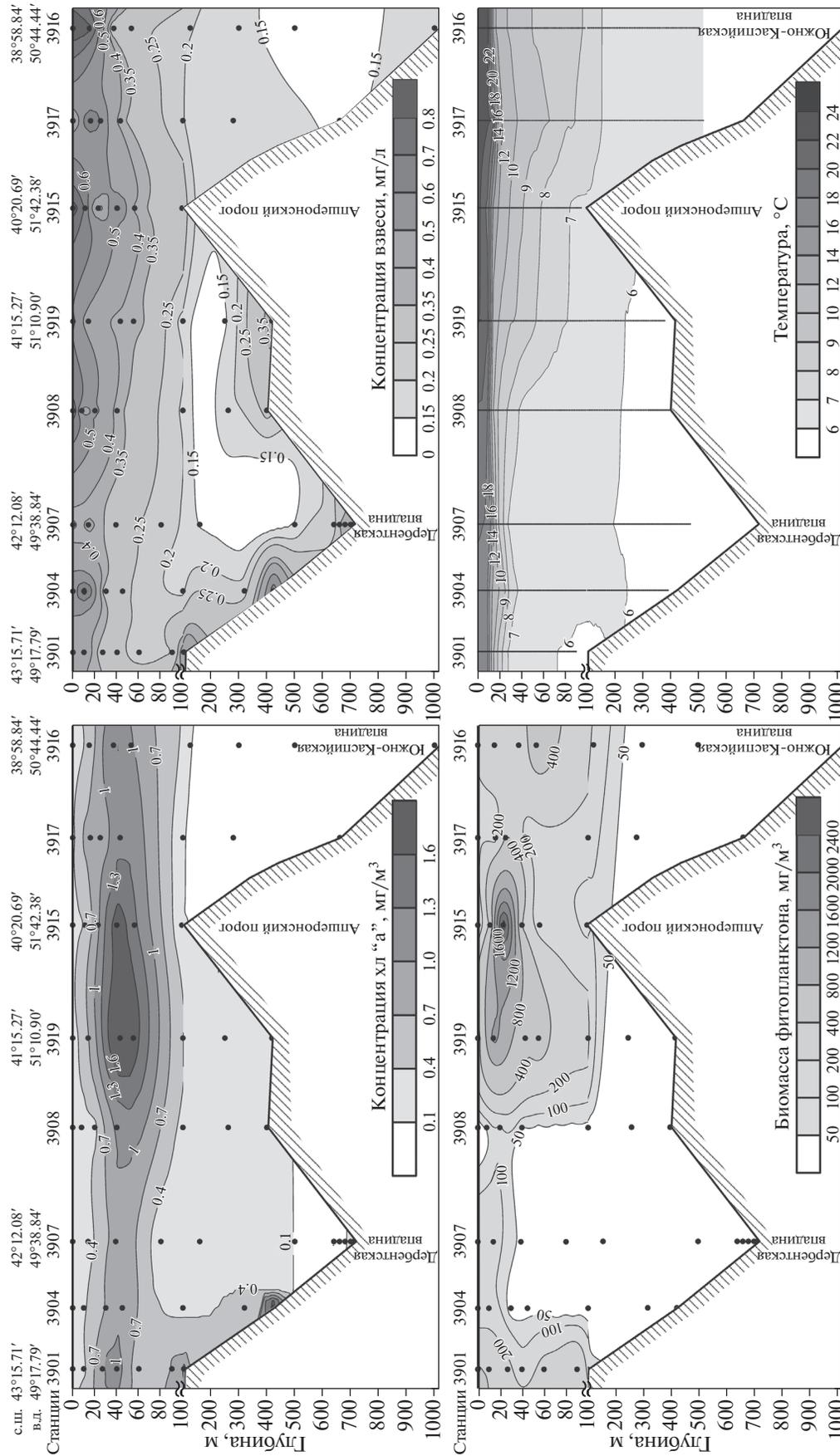


Рис. 4. Вертикальное распределение хл "а", биомассы фитопланктона, взвеси и температуры на осевом транскаспийском разрезе по [2, 11, 32] с добавлениями. Положение разреза см. рис. 1.

$\geq 100$  м. В Дербентской впадине концентрация взвеси у дна (1–2 м от поверхности дна) достигала 0.7 мг/л, в то время как в промежуточном глубинном водном слое она не превышала 0.2 мг/л.

**Концентрация хл “а”.** Высокие концентрации хл “а” ( $>0.6$  мг/м<sup>3</sup>), в отличие от взвеси, обнаружены на горизонтах  $\geq 20$ –60 м и приурочены к глубине залегания сезонного термоклина. Мощность слоя варьировала от  $\sim 20$ –30 м (глубоководные области Дербентской и Южно-Каспийской впадин) до  $\sim 40$ –60 м (южная периферия Дербентской впадины  $\rightarrow$  Апшеронский порог) (рис. 4). Доля фео “а” повсеместно составляла  $\sim 20$ –40%.

В пределах глубин  $\sim 20$ –60 м хлорофиллонесущий слой простирается через всю акваторию моря как в субмеридиональном, так и в субширотном направлении, обуславливая на внутреннем и срединном шельфе повышенные концентрации хл “а” у дна (рис. 5). На прибрежных станциях поперечного разреза (ст. 3906 и ст. 3902) концентрация хл “а” в придонном горизонте в 4–5 раз выше, чем в ВПС. Причем у дна вблизи восточного берега Среднего Каспия она в  $\sim 2$  раза выше, чем вблизи западного берега.

У восточного побережья Среднего Каспия (станции 3902  $\rightarrow$  3910  $\rightarrow$  3914) в подтермоклином слое ( $\sim 15$ –40 м) воды (т.е. вблизи дна) концентрация хл “а” достигала 1.75 мг/м<sup>3</sup>. Это область зарождающегося сезонного апвеллинга, который обычно наблюдается с середины мая по октябрь, с холодной температурной аномалией у берега на участке акватории от п-ова Тюб-Караган до Красноводского п-ова. По спутниковым изображениям для этой апвеллинговой области, в отличие от областей апвеллинга в других морях и океанах, характерны низкие концентрации хл “а” в оптически прозрачном слое фотической зоны [14]. Однако, как показали наши измерения, в подтермоклиновых водах резко возрастала концентрация хл “а” и биомасса фитопланктона. Вероятно, обилие автохтонной взвеси в этой области обусловлено поступлением биогенных элементов вследствие подъема глубинных среднекаспийских вод в процессе ветрового сгона. Доказательства существования такого механизма подъема вод обсуждались в ряде работ [14, 22].

Максимальное значение концентрации в пределах хлорофиллонесущего слоя составляло 2.3 мг/м<sup>3</sup> (ст. 3919, 43 м), а среднее  $\sim 1$  мг/м<sup>3</sup> ( $n = 41$ ), что характерно для водоемов с высоким трофическим статусом. Доля хл “а” (от концентрации ВОВ в этом слое) варьировала от 1 до 35%, достигая наиболее высоких значений на горизонте  $\sim 60$  м.

В условиях жесткой стратификации при низких концентрациях биогенных элементов во многих районах океана часто формируется подповерхностный или глубинный максимум хл “а” [36]. Этот слой формируется либо за счет скопления фитопланктона при условии наличия необходи-

мых биогенных элементов и доступности света для фотосинтеза; либо, наоборот, не является следствием высокой биомассы фитопланктона, а лишь результатом увеличения концентрации пигмента на клетку водоросли. Изучение вертикальной структуры фитопланктона позволит выяснить природу этого слоя.

В глубинном водном слое (от  $\sim 40$ –60 м до дна) изменчивость концентраций хл “а” значительна: от 0.01 до 1.8 мг/м<sup>3</sup>. Повышенные концентрации ( $>0.2$  мг/м<sup>3</sup>) установлены в придонном слое Дербентской впадины и по ее периферии. На северном склоне впадины (станции 3901, 3904, 3905) они превышали 1 мг/м<sup>3</sup>, а доля фео “а” составляла  $<30\%$ . Это район палеорусл р. Волги, для которого характерен придонный нефелоидный слой. Придонное течение направлено в соответствии с морфологией простираения палеорусла (в юго-юго-западном направлении), которое служит каналом для выноса взвеси в глубоководную часть Дербентской впадины [3]. Доля хл “а” в составе ВОВ достигала 32% на самой северной ст. 3901 (горизонт 103 м). Вероятно, на северной периферии впадины работает некий единый механизм доставки хлорофиллосодержащих клеток фитопланктона на глубины  $>100$  м, о чем подробнее см. ниже.

В наддонном слое воды (1–30 см от дна), отобранном с помощью мультикорера, многократно возрастали концентрации взвеси и ВОУ: до 19 мг/л и до 1460 мг/м<sup>3</sup> соответственно (таблица). Забегая вперед, следует отметить, что было установлено обогащение этого слоя тяжелым  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ВОУ}}$  (до  $-23.8\text{‰}$ – $-18.6\text{‰}$ ). Концентрация хл “а” также многократно возрастала (до 78 мг/м<sup>3</sup>). Содержание хл “а” в составе ВОВ – 1–8%. Доля фео “а” не превышала 30–40%, что указывает на относительно слабую степень трансформации хл “а” в процессе осаждения в водной толще (в т.ч. в составе фекальных комков), включая сероводородные области. В сероводородной зоне впадин хл “а” фиксировался повсеместно, варьируя от 0.01 до 0.2 мг/м<sup>3</sup>. О хорошей сохранности этого фитопигмента в присутствии сероводорода сообщалось ранее в работе [34].

В наилке (верхний флокулированный слой над осадком, имеющий влажность  $\geq 90\%$ ), где взвесь из рассеянной формы существования вещества переходит в связанную форму и образует новый вещественный комплекс – осадок, также повсеместно определялся хл “а” (до 1.39 мкг/см<sup>3</sup>).

**Концентрация и состав фитопланктона.** Основным фактором, определяющим вертикальную структуру фитопланктона верхнего деятельного слоя Среднего и Южного Каспия, является степень стратифицированности водной толщи по температуре [21]. При слабом уровне стратификации в верхних слоях воды (ВПС + слой сезонного тер-

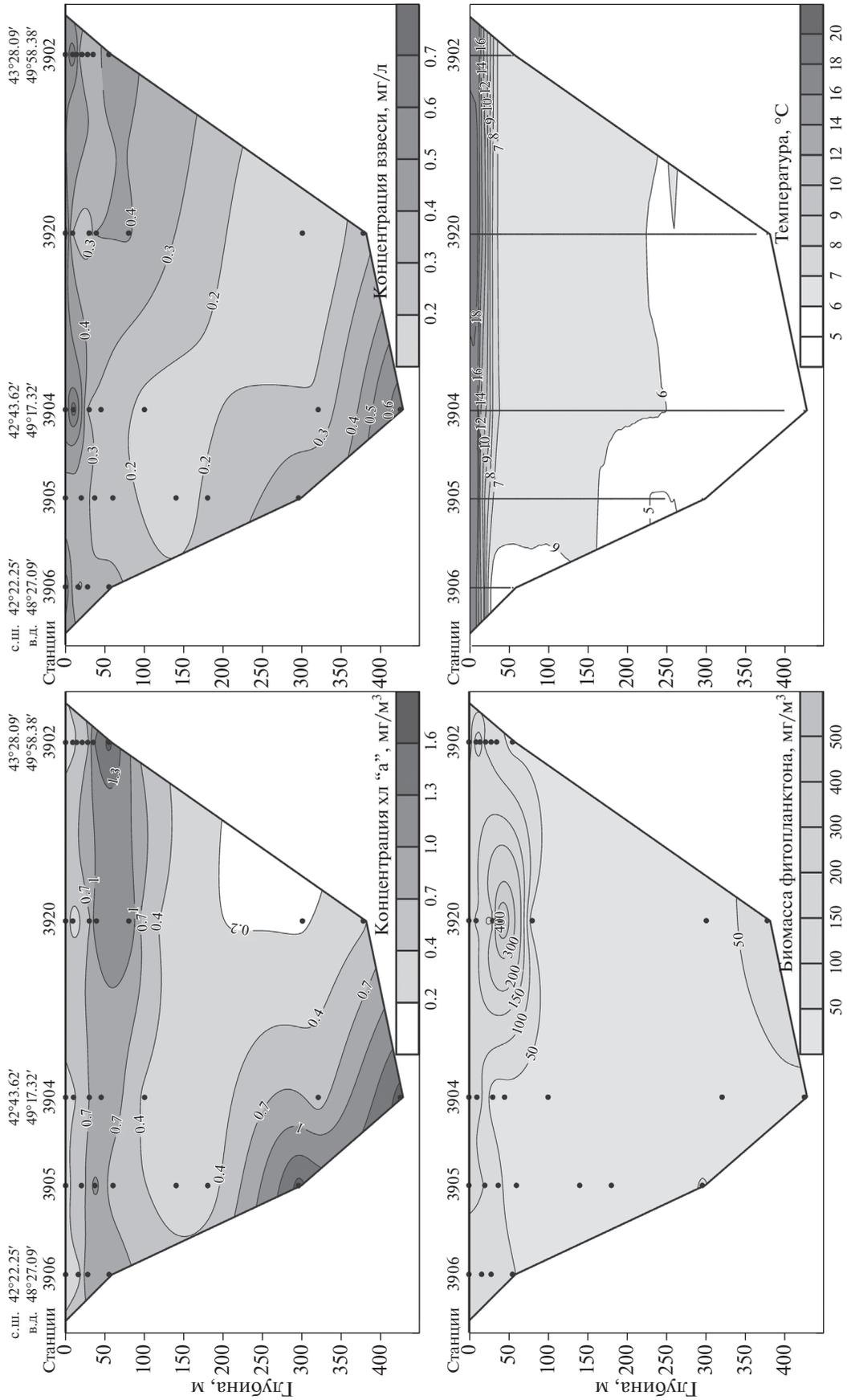


Рис. 5. Вертикальное распределение хл "а", биомассы фитопланктона, взвеси и температуры на поперечном разрезе в Среднем Каспии. Положение разреза см. рис. 1.

моклина) доминируют диатомовые водоросли зимне-весеннего комплекса. Дальнейшая стратификация вследствие летнего прогрева вызывает развитие диатомей тепловодного сообщества в ВПС. Усиление стратификации приводит к истощению минеральных форм биогенных элементов в слое над сезонным термоклином и, как следствие, к преимущественному развитию миксотрофных форм динофлагеллят.

В работе Паутовой и др. [21] показано, что в ранний летний период фитопланктон глубоководных районов Среднего и Южного Каспия имел сходную видовую, количественную и вертикальную структуры. Выделены два типа сообщества, разделенных нижней границей сезонного термоклина: 1) тепловодное (световое) и 2) холодноводное (подтермоклинное теневое). Наличие двух типов сообществ в жестко стратифицированных водах характерно для южных морей и тропических широт океана [23].

В тепловодном сообществе доминирующий комплекс видов был представлен крупной центральной диатомеей *Coscinodiscus perforatus* (в Дербентской впадине до 90% суммарной биомассы) и динофлагеллятами *Prorocentrum cordatum*, *P. micans* и *Gonyaulax polygramma* (к северу от Апшеронского порога и в Южно-Каспийской впадине до 94% суммарной биомассы). На разрезе к югу от ст. 3919 биомасса динофлагеллят в 20–100 раз превышала биомассу диатомовых.

В холодноводном сообществе глубоководных впадин доминировали, как правило, диатомовые *Pseudonitzschia seriata*, *Dactyliosolen fragilissimus*. Концентрация хл “а” в этом слое в 2–3 раза превышала его концентрацию в ВПС, а доля фео “а” не превышала ~30%. Велика вероятность, что виды фитопланктона, образующие это сообщество, способны сохранять фотосинтетические функции в условиях затенения на значительной глубине.

В Дербентской впадине и на ее северной периферии показатель  $C_{\text{орг}}\text{-Ф/хл “а”}$  обычно не превышал 20 на всех горизонтах опробования. Величина биомассы фитопланктона в подтермоклинном слое приближалась к таковой в ВПС. Здесь пик интенсивности флуоресценции хл “а” указывал лишь на высокую концентрацию этого пигмента на клетку водоросли.

У восточного побережья Среднего Каспия в области зарождающегося апвеллинга (станции 3910, 3914, глубина <50 м) как в тепловодном, так и в холодноводном сообществе по биомассе доминировали динофлагелляты, прежде всего, *P. cordatum*, а также *G. polygramma*, *P. micans* и *Diplopsalis lenticula*. Наибольшие концентрации хл “а” были приурочены к подтермоклинному слою, который одновременно являлся придонным в силу небольшой глубины моря. Здесь единообразно увеличивались количественные показатели хл “а” и фитопланктона.

На участке осевого разреза от южной периферии Дербентской впадины – Южная впадина – Апшеронский порог (станции 3919 → 3915) вблизи нижней границы термоклина (14–23 м) наблюдались максимально высокие количественные показатели фитопланктона (1.3–2.6 г/м<sup>3</sup> или 127–249 мгС/м<sup>3</sup>,  $C_{\text{орг}}\text{-Ф/хл “а”}$  до 271) при концентрации хл “а” 0.7–0.9 мг/м<sup>3</sup>. Здесь скапливались микроводоросли всех систематических групп, встречающихся в Каспийском море. Основу биомассы холодноводного сообщества создавали крупные виды динофлагеллят и диатомовых, в том числе виды-вселенцы [21, 28, 33]. В подтермоклинном слое 40–55 м этой части акватории отмечены наиболее высокие для всего моря концентрации хл “а” (до 1.9–2.3 мг/м<sup>3</sup>). При этом биомасса фитопланктона была ≥5 раз ниже, чем у нижней границы термоклина, а отношение  $C_{\text{орг}}\text{-Ф/хл “а”}$  составляло <30. Способность динофлагеллят к самостоятельному передвижению в воде позволяет им скапливаться вблизи термоклина, куда поступают биогенные элементы из нижележащих слоев воды. Однако на глубине >40 м создается дефицит света, что, вероятно, провоцирует возрастание количества пигмента на клетку водоросли. Эта область скопления фитопланктона имеет топографическую привязку, о чем упоминалось выше.

Холодноводное сообщество подтермоклинных вод формируется из остатков фитоценозов зимне-весеннего цветения, происходящего в Среднем Каспии в конце февраля–марте [33]. Виды этих цветений – *P. seriata*, *Cerataulina pelagica*, *Chaetoceros peruvianus* – являющиеся видами-вселенцами, появившимися в Каспийском море сравнительно недавно (15–20 лет назад) и вытеснившими доминирующие аборигенные виды [7, 28]. Виды-вселенцы получают преимущество по сравнению с аборигенными видами за счет своей большей устойчивости к меняющимся гидрологическим и гидрохимическим условиям среды при современном состоянии Каспийского моря [21].

Одним из наиболее вероятных факторов формирования раннелетнего подповерхностного максимума хл “а” является погружение водорослей – остатков фитоценозов зимне-весеннего цветения. Ранее было показано, что более старые клетки, попадая в обогащенные биогенными элементами слои, особенно в условиях затенения, оседают медленнее [23]. Так происходит скопление водорослей у основания фотического слоя. В Каспийском море слабый фотосинтез отмечается до глубин 57–70 м [8]. Погружение водорослей в более глубокие слои фотической зоны может сопровождаться увеличением концентрации в их клетках хл “а”, а также, возможно, увеличением скорости их деления, поскольку содержание биогенных элементов там выше, чем у поверхности [23, 36].

В придонном (6–9 м от дна) слое воды по северному краю Дербентской впадины в районе палеорула р. Волги (станции 3904, 3905, 3920, глубина моря 295–424 м) зафиксированы скопления клеток *P. seriata* содержащих хлоропласты (до  $4.0\text{--}6.0 \times 10^4$  кл/л) [21]. Суммарная биомасса в этом слое достигала  $88 \text{ мг/м}^3$ , а концентрация хл “а” –  $1.7 \text{ мкг/л}$  (доля фео “а” 30–40%). Нахождение таких клеток на большой глубине нельзя объяснить процессами естественной седиментации ( $\sim 1 \text{ м/сут}$ ). Существует другой механизм доставки клеток фитопланктона на большие глубины: придонные течения из шельфовой области к центру глубоководных впадин – склоновый каскадинг [27].

На глубинах  $\sim 500 \text{ м}$  в центральных районах Дербентской и Южно-Каспийской впадин также обнаружены планктонные водоросли различных таксономических групп. Это клетки *P. seriata* и пресноводной зеленой водоросли *Binuclearia lauterbornii* var. *lauterbornii*, содержащие хлоропласты и образующие длинные цепочки, в количестве нескольких сотен клеток в литре (станции 3907, 3916, 3917). Из других видов следует отметить пресноводные зеленые водоросли *Pediastrum duplex* и *Scenedesmus quadricauda*, единично встреченные на этой же глубине и также не потерявшие хл “а” (ст. 3916) [21]. Присутствие этих водорослей на 500-метровой глубине может быть следствием поступления холодных вод кавказских рек по системе подводных каньонов с шельфа в глубоководную часть моря [9].

Факты обнаружения клеток с хлоропластами и их скоплений в глубинном слое Каспийского моря ( $t \text{ воды} \leq 6^\circ\text{C}$ ) свидетельствуют об устойчивости хл “а” в растительных клетках на больших глубинах далеко за пределами фотической зоны.

**Концентрация ВОУ** в водной толще Среднего и Южного Каспия варьировала от  $0.3 \text{ мг/м}^3$  на горизонтах более 100 м до  $141 \text{ мг/м}^3$  вблизи термоклина. Доля ВОУ во взвеси также колебалась в широких пределах (0.1–33%). Наиболее высокие значения  $\geq 20\%$  приурочены к области термоклина южной части осевого разреза (южная периферия Дербентской впадины – Апшеронский порог – Южно-Каспийская впадина, станции 3919–3916) и северо-восточной периферии Дербентской впадины (Северная впадина, ст. 3920).

**Изотопный состав ВОУ.** В водной толще Среднего и Южного Каспия значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ВОУ}}$  в июне 2012 г. варьировали от  $-29.9$  до  $-21.9\text{‰}$ . Известно, что для морского фитопланктона характерны значения, лежащие в интервале от  $-22$  до  $-17\text{‰}$  [4]. В области термоклина отмечается тенденция утяжеления изотопного состава ВОУ (возрастание вклада фитопланктоногенного ОВ) к югу от Дербентской впадины на осевом разрезе (станции 3919–3916) и на восточном шельфе Среднего Каспия – область апвеллинга (станции 3910–3914) (рис. 6). В

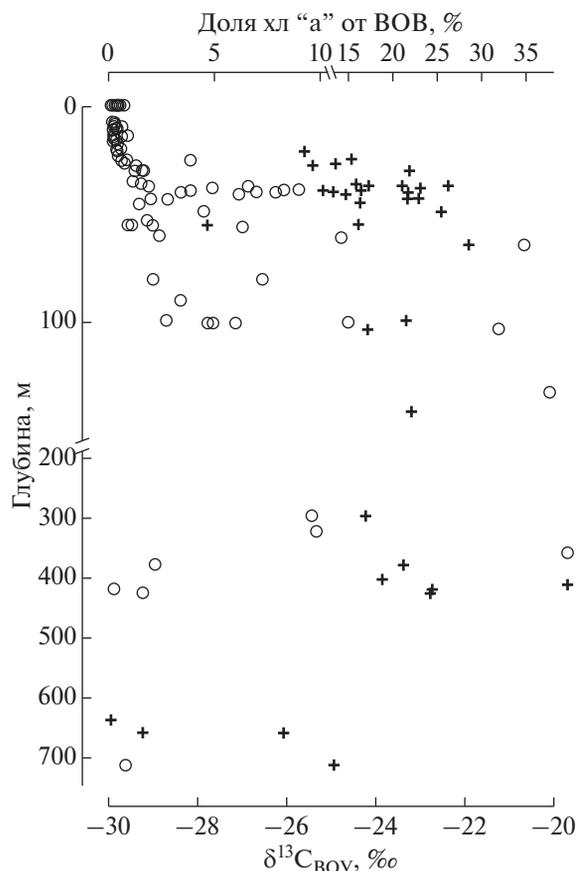


Рис. 6. Распределение доли хл “а” от ВОВ (1) и  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ВОУ}}$  (2) в водной толще Среднего и Южного Каспия.

апвеллинге в подтермоклинном слое воды ВОУ изотопно-тяжелее ( $-21.9\text{‰}$ , ст. 3911), чем в центральной части Среднего Каспия. В процессе ветрового сгона среднекаспийская глубинная вода, обогащенная биогенными элементами, выходит к поверхности у восточного побережья [22]. Вероятно, утяжеление изотопного состава ВОУ под слоем термоклина происходило вследствие увеличения вклада биомассы фитопланктона. С другой стороны, в работе Леин и др. [32] сообщалось, что в поверхностном слое этой части акватории утяжеление  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ВОУ}}$  вызвано примесью эолового материала, содержащего фрагменты изотопно-тяжелой растительности, характерной для пустынь.

В Дербентской впадине и на северной ее периферии значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ВОУ}}$  изотопно-легче, как в области термоклина, так и в придонном слое по сравнению с акваториями моря, расположенными южнее. Здесь, в первую очередь, сказывается влияние ОВ речного генезиса.

Вертикальная структура распределения величин  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ВОУ}}$  так же неоднородна, как и пространственная. В аэробной водной толще Среднего Каспия, как правило, отмечается тенденция утяжеления значений  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ВОУ}}$  от слоя термоклина к

придонному горизонту (увеличение вклада ОВ планктонного генезиса).

В глубоководной части Дербентской впадины (ст. 3907) установлено заметное облегчение изотопного состава  $\text{VOU}$  на границе сероводородной зоны (в переходном слое 640–680 м от аэробного к анаэробному сероводородсодержащему) до  $-29.9\%$  по сравнению с подповерхностным слоем максимума хл “а” ( $-25.2\%$ ). В Южно-Каспийской впадине (станции 3916, 3917, глубины 600–100 м) у дна величины  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VOU}}$  на  $4\%$  легче (до  $-26.7\%$ ), чем в слое термоклина — максимума хл “а” (до  $-22.4\%$ ). Ранее было доказано, что в анаэробной зоне впадин протекает микробный автотрофный процесс метаногенеза, с образованием изотопно-легкой биомассы микроорганизмов (новообразованного  $\text{VOU}$ ) [15, 32].

Был проанализирован изотопный состав растворенного углерода бикарбонат-иона в воде Дербентской и Южно-Каспийской впадин в мае–июне 2012 г. [32]. Известно, что от состава  $\delta^{13}\text{C}-\text{HCO}_3^{-1}$  зависит изотопный состав углерода биомассы фитопланктона. Величины  $\delta^{13}\text{C}-\text{HCO}_3^{-1}$  колебались в пределах от  $-3.75$  до  $+3.18\%$ , что характеризует бикарбонат-ион, в основном, как морской. Преобладание морских видов в составе фитопланктона было подтверждено прямым микроскопическим обследованием [21].

В Среднем и Южном Каспии в июне 2012 г. выявлена пространственная неоднородность в распределении значений  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VOU}}$  в водной толще: изменение состава отмечается как в направлении с севера на юг, так и в водной толще от поверхностного слоя к придонному. Величины  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VOU}}$  и их распределение, в целом, соответствуют пространственной и вертикальной структурам фитопланктона и, в том числе, концентраций хл “а” верхней части водной толщи до  $\sim 500$  м и обусловлены биогеохимическими процессами на редокс-барьере (горизонт  $\sim 600$  м).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В начале лета максимальные значения изученных параметров были характерны для области маргинального фильтра (МФ) дельта Волги — Северный Каспий. Оказалось, что только  $\sim 2\text{--}5\%$  взвеси и  $\sim 3\%$   $\text{VOU}$  от исходной величины поступало в Средний Каспий после прохождения области МФ. Концентрации хл “а” и  $\text{VOU}$  распределялись в соответствии с концентрацией взвеси в воде.

Тем не менее, поступление аллохтонного ОВ с волжским стоком и дефицит минеральных форм биогенных элементов уже в начале лета, лимитирующих развитие фитопланктона и обуславливающих низкие концентрации хл “а” в ВПС, сдвигают  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VOU}}$  в сторону облегчения в Дербентской

впадине и на ее северной периферии по сравнению с акваториями, расположенными южнее.

К началу лета формирование жесткой стратификации водной толщи по температуре определяет вертикальное распределение аллохтонной и автохтонной взвеси в Среднем и Южном Каспии. Верхний перемешанный слой относительно обогащен взвесью за счет частиц как речного, так и эолового генезиса. В то же время этот слой обеднен хл “а” в силу адаптационных механизмов теплопроводного фитоценоза (высокая световая насыщенность) и низких концентраций необходимых биогенных элементов.

В оптически прозрачном слое Среднего и Южного Каспия авторами практически повсеместно установлена низкая концентрация хл “а” ( $\leq 0.5$  мг/м<sup>3</sup>). Только Северный Каспий обычно отличается высокой концентрацией хл “а” в поверхностном слое с апреля по ноябрь.

Повсеместно в Среднем и Южном Каспии установлен подповерхностный максимум хл “а” на глубине  $\sim 20\text{--}60$  м. Это слой мощностью от 20 до 40 м и концентрацией хл “а”  $\sim 1\text{--}2$  мг/м<sup>3</sup>, что в 2–3 раза превышало таковую в ВПС. Положение этого слоя приурочено к глубине залегания сезонного термоклина и обусловлено развитием холодноводного (теневого) сообщества фитопланктона. На срединном и внутреннем шельфе хлорофиллосущий слой выклинивался у дна, следуя за положением термоклина. Поэтому для мелководных станций характерно повышение концентрации хл “а” в придонном слое.

Подповерхностная область наибольшего скопления фитопланктона, характеризующегося высокими концентрациями хл “а” и протягивающаяся от южной периферии Дербентской впадины до Апшеронского порога, является топографически привязанной и соответствует области высоких вертикальных потоков вещества и высокой скорости седиментации. Высокая интенсивность флуоресценции хл “а” в слое термоклина Дербентской и Южно-Каспийской впадин не являлась следствием скопления фитопланктона, а лишь указывала на увеличение количества пигмента на клетку водоросли.

Попытки достоверной оценки концентрации хл “а” и величины первичной продукции в оптически прозрачном слое (являющемся лишь верхней частью деятельного слоя) по спутниковым данным в Среднем и Южном Каспии представляются авторам затруднительными и даже некорректными вследствие значительной вариабельности отношения  $C_{\text{орг}}-\text{Ф}/\text{хл “а”}$  в клетках водорослей и заглупления хлорофиллосущего слоя (до 60 м). В Каспийском море обнаружился недостаток современных прямых измерений величины первичной продукции.

Область апвеллинга у восточного побережья Среднего Каспия характеризовалась низкими

концентрациями хл “а” в поверхностном слое, что подтверждается соответствующими спутниковыми изображениями. Однако, под термоклином (на глубине 25–39 м в зависимости от глубины моря) в области апвеллинга возрастают синфазно концентрация хл “а” и обилие фитопланктона. Состав  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ВОУ}}$  утяжеляется по сравнению с центральной частью Среднего Каспия. В этой области по биомассе доминировали динофлагелляты как в поверхностном тепловодном, так и в подповерхностном холодноводном сообществах.

Установлено наличие хл “а” на глубинах, превышающих 300–400 м (до  $\geq 1$  мг/м<sup>3</sup>). Этот факт подкреплен находками отдельных клеток водорослей с хлоропластами и даже их скоплений в глубинном слое воды, в том числе, на северном склоне Дербентской впадины, где эти скопления являются следствием каскадинга. В сероводородной зоне Дербентской и Южно-Каспийской впадин хл “а” фиксировался повсеместно. Относительно небольшая доля фео “а” (<40%) у дна косвенно указывает на слабую трансформацию хл “а” в процессе осаднения в водной толще (в т.ч. в составе фекальных комков). Установлена аккумуляция хл “а” в наддонном слое воды (0–30 см от поверхности дна). Выявлено обогащение этого слоя тяжелым  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ВОУ}}$ .

Подъем уровня Каспийского моря и связанные с этим явлением процессы, протекающие в водной толще этого моря (формирование устойчивой стратификации, развитие гипоксии и аноксии, наличие свободного сероводорода и метана во впадинах и др.), способствуют замедлению полной трансформации осаждающегося на дно ОВ, выводя из круговорота органические соединения, не достигшие полного разложения [25, 32]. Все это приводит к обогащению наилка сапропелевым ОВ.

Авторы благодарят научного руководителя исследований академика А.П. Лисицына за полезное обсуждение и ценные комментарии, начальника экспедиции А.К. Амбросимова, А.С. Саввичева, Ю.А. Гольдина, Л.В. Демину, А.В. Коржа, В.А. Григорьеву и Ю.И. Венцкута за помощь в сборе и обработке материала.

Обработка материалов выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ (проект № 14-27-00114 “Седименто-биогеохимические исследования морей европейской части России (рассеянное осадочное вещество, донные осадки, диагенез). Взаимодействие геосфер, потоки вещества и энергии”). Интерпретация данных проведена в рамках Государственного задания ИО РАН на 2015–2017 гг. по теме № 0149-2014-0026.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агатова А.И., Кирпичев К.Б., Лапина Н.М. и др. Органическое вещество Каспийского моря // *Океанология*. 2005. Т. 45. № 6. С. 841–850.
2. Амбросимов А.К., Кловиткин А.А., Гольдин Ю.А. и др. Комплексные исследования системы Каспийско-

го моря в 39-м рейсе научно-исследовательского судна “Рифт” // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 3. С. 428–432.

3. Амбросимов А.К., Лукашин В.Н., Либина Н.В. и др. Комплексные исследования системы Каспийского моря в 35-м рейсе научно-исследовательского судна “Рифт” // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 1. С. 150–155.
4. Галимов Э.М. Природа биологического фракционирования изотопов. М.: Наука, 1981. 247 с.
5. Иванов М.В., Беляев С.С., Лауринавичус К.С., Обрацова А.Я. Микробиологическое образование  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CH}_4$  в современных и четвертичных отложениях Каспийского моря // *Геохимия*. № 3. 1980. С. 416–422.
6. Иванов М.В., Саввичев А.С., Кловиткин А.А. и др. Возобновление сероводородного заражения водной толщи глубоководных впадин Каспийского моря // *Докл. РАН*. 2013. Т. 453. № 1. С. 76–81.
7. Карпинский М.Г. Об особенностях вселения морских видов в Каспий // *Российский журнал биологических инвазий*. 2009. № 2. С. 2–7.
8. Каспийское море. Фауна и биологическая продуктивность / Под ред. Яблонской Е.А. М.: Наука, 1985. 264 с.
9. Кивва К.К., Полякова А.В. Основные факторы изменения гидрохимической структуры Каспийского моря // *Материалы XIX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии*. Т. III. М.: ГЕОС, 2011. С. 335–339.
10. Киселев И.А. Планктон морей и континентальных водоемов. Т. 1. Л.: Наука, 1969. 657 с.
11. Кравчишина М.Д., Кловиткин А.А., Паутова Л.А. и др. Хлорофилл “а” во взвеси Каспийского моря как показатель условий биогенной седиментации // *Докл. РАН*. 2015. Т. 465. № 3. С. 357–362.
12. Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Политова Н.В. и др. Исследование биогенной и абиогенной части взвеси дельты реки Волги в период весеннего половодья, май 2008 г. // *Водные ресурсы*. 2013. Т. 40. № 2. С. 151–164.
13. Кутюрин В.М., Лисицын А.П. Растительные пигменты во взвеси и донных осадках Индийского океана // *Океанологические исследования*. 1961. № 3. С. 90–116.
14. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 408 с.
15. Леин А.Ю., Русанов И.И., Кловиткин А.А. и др. Биогеохимические процессы в водной толще Каспийского моря в ноябре 2008 г. // *Докл. РАН*. 2010. Т. 434. № 6. 786–790.
16. Лебедев Л.И. Фациальные зоны и мощности новокаспийских отложений Среднего Каспия // *Океанология*. 1963. Т. 3. № 6. С. 1029–1038.
17. Лисицын А.П. Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы “живого океана” // *Геология и геофизика*. 2004. Т. 45. № 1. С. 15–48.
18. Лукашин В.Н., Амбросимов А.К., Либина Н.В. и др. Комплексные исследования в северной части Каспийского моря в 30-м рейсе научно-исследовательского судна “Рифт” // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 3. С. 472–476.

19. Лукашин В.Н., Лисицын А.П., Новигатский А.Н. и др. О вертикальных потоках вещества в Каспийском море // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 2. С. 216–255.
20. Панин Г.Н., Соломонова И.В., Выручалкина Т.Ю. Режим составляющих водного баланса Каспийского моря // *Водные ресурсы*. 2014. Т. 41. № 5. С. 488–495.
21. Паутова Л.А., Кравчишина М.Д., Востоков С.В. и др. Особенности вертикального распределения фитопланктона Каспийского моря в летний период // *Докл. РАН*. 2015. Т. 462. № 4. С. 479–483.
22. Пахомова А.С., Косарев А.Н. Гидрохимические условия и генезис аномально холодных вод у восточного побережья Среднего Каспия // *Исследования по теоретической и прикладной химии*. М.: Наука, 1972. С. 73–81.
23. Раймонт Дж. Планктон и продуктивность океана. Т. 1. Фитопланктон. Пер. с англ. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. 568 с.
24. Романкевич Е.А. Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977. 256 с.
25. Сапожников В.В., Мордасова Н.В., Метревели М.П. Трансформация экосистемы Каспийского моря в период опускания и подъема уровня // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 4. С. 524–533.
26. Система Белого моря. Т. 3. Рассеянный осадочный материал гидросферы, микробные процессы и загрязнения / Отв. ред. Лисицын А.П. М.: Научный мир, 2013. 668 с.
27. Тужилкин В.С., Гончаров А.В. О вентиляции глубинных вод Каспийского моря // *Тр. ГОИН*, 2008. Вып. 211. С. 43–64.
28. Шиганова Т.А., Мусаева Э.И., Паутова Л.А., Булгакова Ю.В. Проблема вселенцев в Каспийское море в связи с новыми находками в нем черноморских видов зоо- и фитопланктона // *Изв. РАН. Сер. биол.* 2005. № 1. С. 78–87.
29. Arar E.J., Collins G.B. Method 445.0. *In vitro* determination of chlorophyll “a” and pheophytin “a” in marine and freshwater algae by fluorescence. Revision 1.2. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 1997. 22 p.
30. Druffel E.R.M., Williams P.M. Importance of isotope measurements in marine organic chemistry // *Mar. Chem.* 1992. V. 39. № 1–3. P. 29–215.
31. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V. Case studies of optical remote sensing in the Barents Sea, Black Sea and Caspian Sea // *Remote sensing of the European Seas*. Springer, 2008. P. 53–66.
32. Lein A.Yu., Savvichev A.S., Kravchishina M.D. et al. Microbiological and biogeochemical properties of the Caspian Sea sediments and water column // *Microbiology*. 2014. V. 83. № 5. P. 648–660.
33. Pautova L.A., Silkin V.A., Vostokov S.V. The phytoplankton of the present day Central Caspian Sea // *Natural Resources and Environmental Issues*. 2009. V. 15. Article 37.
34. Reuss N., Conley D.J., Bianchi T.S. Preservation conditions and the use of sediment pigments as a tool for recent ecological reconstruction in four Northern European estuaries // *Marine Chemistry*. 2005. № 95. P. 283–302.
35. Rybakova I.V., Kopelevich O.V., Burenkov V.I. et al. Validation of the satellite bio-optical algorithms in the Caspian Sea // *Current problems in optics of natural waters*. St. Petersburg: Nauka, 2011. P. 196–198.
36. Simpson J., Sharples J. *Physical and biological oceanography of shelf seas*. Cambridge University Press, 2012. 424 p.
37. Stephens M.P., Kadko D.C., Smith C.R., Latasa M. Chlorophyll “a” and pheopigments as tracers of labile organic carbon at the central equatorial Pacific seafloor // *Ceochim. et Cosmochim. Acta*. 1997. V. 61. № 21. P. 4605–4619.

## Vertical Distribution of Suspended Particulate Matter in the Caspian Sea in Early Summer

M. D. Kravchishina, A. Yu. Lein, L. A. Pautova, A. A. Klyuvitkin, N. V. Politova,  
A. N. Novigatsky, V. A. Silkin

The features of the vertical distribution of chlorophyll “a”, particulate organic carbon and its isotopic composition, total suspended particulate matter (SPM) and the structure of phytoplankton in the Middle and Southern Caspian in May–June 2012 are discussed. Subsurface chlorophyll “a” maximum (SCM) was found everywhere at the depth from ~20 to 40–60 m. The pigment concentration in SCM was 2–3 times higher than in the upper mixed layer. The position of this layer is confined to the depth of the seasonal thermocline and caused by the development of cold-water (dark) phytoecenosis. The genesis of this layer was studied. The increasing of the chlorophyll “a” concentration in this layer caused by the abundance of phytoplankton or by increasing concentration of this phytopigments per cell of algae. The highest values of the studied organic compounds and phytoplankton biomass are revealed close to the seasonal thermocline in the water area from the southern periphery of the Derbent Depression to Apsheron Sill, where the isobaths of continental slope change their direction from submeridional to sublatitudinal. The presence of chlorophyll “a” at the depths >300 m (up to  $\geq 1 \text{ mg/m}^3$ ) was revealed. This fact was supported by the findings of individual algal cells containing chlorophyll “a”, and even their associations in the deep layer of water. The most probable ways of supply of these cells to the deep waters are discussed. The vertical distribution of the values of the organic carbon isotopic composition primarily caused by the vertical structure of phytoplankton and chlorophyll “a” in the water column up to ~ 500 m and by biogeochemical processes in the redox barrier (layer ~600 m). The relative stability of chlorophyll “a” and the stability of pheophytin “a” in an anaerobic environment was verified. The significant amount of weakly transformed chlorophyll “a” was found close the bottom of the sea.