

### 2.3. Особенности распределения органического вещества в водах Черного моря

*А.И. Агатова, Н.М. Лапина, Н.И. Торгунова*

#### Введение

Органическое вещество (ОВ) в море – это интегральный показатель, величина которого в основном зависит от трофности вод, от соотношения скоростей про-дукционно-деструкционных процессов и от величины берегового стока. Количественное и качественное изучение растворенного (РОВ) и взвешенного (ВОВ) органического вещества, изменчивость его концентраций, элементного и биохимического состава во времени и пространстве необходимо для понимания процессов, формирующих и поддерживающих функционирование и продуктивность морской экосистемы.

Черное море является самой большой акваторией, основную часть которой составляют воды, содержащие сероводород ( $H_2S$ ). Эти воды занимают до 90% объема моря. Впервые о наличии  $H_2S$  в глубинных водах было сообщено в 1890 г. в отчете о результатах российской экспедиции в Черное море, цит. по [Коновалов, Еремеев, 2012]. Только прибрежные воды (если в них нет заморных явлений) и воды верхнего 80–200 метрового слоя глубоководной части моря не содержат этого ядовитого газа.

По биогидрохимическим характеристикам глубоководные экосистемы Черного моря делятся на три основные зоны: 1) верхний слой, насыщенный кислоро-

дом, в котором происходят основные процессы создания ОВ за счет фотосинтеза и развитие гидробионтов высших трофических уровней, включая рыбу; 2) субкислородный слой, который является результатом формирования вертикальных и горизонтальных потоков кислорода, с одной стороны, и вертикальных потоков  $\text{BOB}$  и  $\text{H}_2\text{S}$ , с другой; 3) сероводородная зона, в которой происходит как хемосинтез ОВ, так и анаэробное разложение поступающего сюда ОВ за счет деятельности соответствующих микроорганизмов, и в которой нет условий для жизни представителей высших трофических уровней.

Горизонты появления  $\text{H}_2\text{S}$  в глубоководной части изменяются в зависимости от синоптической и сезонной изменчивости гидрологической структуры вод. В центре положения этих границ колеблются в пределах 80–110 м, на периферии – от 160 до 250 м. Положение нижней границы в основном определяется соотношением потока  $\text{H}_2\text{S}$  и горизонтального потока кислорода, поступающего с трансформированными босфорскими водами. Этот кислород осуществляет окисление не менее 40%  $\text{H}_2\text{S}$  в водах Черного моря.

Анализируя изменчивость биогидрохимических характеристик этих основных зон за последние 15–20 лет, С.К. Коновалов и В.Н. Еремеев приходят к выводу, что в настоящее время экосистема Черного моря довольно неустойчива и вполне вероятно дальнейшее уменьшение содержания кислорода и расширение субкислородной зоны [Коновалов, Еремеев, 2012].

С этой точки зрения особое значение приобретает исследование ОВ, анализ его пространственной и временной изменчивости как в прибрежных экосистемах, так и во всех трех основных зонах глубоководной экосистемы моря.

К тому же, начиная с первой публикации Дьюзера [Deuser, 1971], до сих пор нет единого мнения, насколько закономерны обнаруживаемые при некоторых исследованиях повышенные концентрации РОВ в водах сероводородной зоны [Агатова, 2017].

Методы отбора проб, подготовки их к анализам и проведения соответствующих анализов подробно описаны в Руководствах [Руководство..., 2003, 2004].

## Пространственно-временное распределение органического вещества

*Растворенный и взвешенный  $C_{орг}$*  (РОУ и ВОУ, соответственно) являются репрезентативными показателями содержания РОВ и ВОВ. Данные по распределению этих показателей в водах Черного моря, полученные из разных источников разными методами, колеблются в очень широких пределах: от 60 до 1000 мкМ для РОУ и от 2,83 до 104,16 мкМ для ВОУ [Скопинцев, 1975; Люцарев, 1996; Агатова, 2017; Deuser, 1971; Karl, Knauer, 1991; Ducklow et al., 2007; Kaiser et al., 2017].

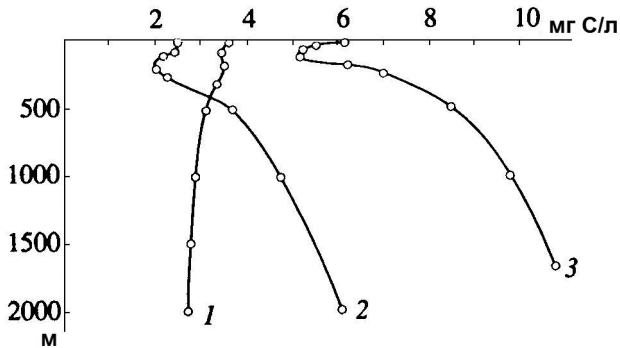
С одной стороны, это объясняется большой пространственно-временной изменчивостью концентраций и свойств ОВ в различных по физико-химическому

составу водах Черного моря. С другой, нельзя исключать различия в методах отбора, фильтрации, обработки и времени хранения проб и, самое главное, в методах окисления  $C_{\text{орг}}$  до  $\text{CO}_2$ . Например, хранение подкисленных проб более недели даже в холодильнике может привести к уменьшению концентрации определяемого  $C_{\text{орг}}$  в 1,5–2 раза. Замораживание же проб, а потом оттаивание перед определением вызывает образование муты за счет денатурации высокополимерных ОВ, которые при долгом хранении могут также сорбироваться на стенках сосудов. Все это приводит к уменьшению концентрации РОУ в отобранных пробах [Скопинцев, 1975; Агатова и др., 1996].

Планомерное изучение органического углерода в водах Черного моря было начато В.Г. Дацко в конце 40-х – начале 50-х годов прошлого столетия, который в основном определял углерод ОВ в плаве селитры [Дацко, 1959]. Б.А. Скопинцев в 60–70-х годах определял РОУ методом сухого сжигания после выпаривания проб воды [Скопинцев, 1975]. Следует отметить, что данные, полученные обоими исследователями, очень близки, особенно для верхнего 200-метрового слоя (255–397 мкМ С по Дацко; 271–314 мкМ С по Скопинцеву). Однако в слое от 200 до 2000 м значения этих концентраций уже различаются – у В.Г. Дацко они мало изменяются по вертикали (от 290 до 258 мкМ С), а у Скопинцева прослеживается явное уменьшение с глубиной – от 254 до 184 мкМ С. Вполне вероятно, что при выпаривании могут теряться легколетучие низкомолекулярные ОВ, концентрации которых увеличиваются в бескислородной зоне моря [Morper, Kieber, 1991].

По данным же американских исследований, которые были проведены на НИС «Atlantis-11» в марте–апреле 1969 г. в районе восточного круговорота, концентрации РОУ увеличиваются с глубиной от 208 мкМ на поверхности до 500 мкМ на глубине 2000 м. В этих пробах концентрации  $C_{\text{орг}}$  определяли методом персульфатного окисления, фиксируя образующийся  $\text{CO}_2$  инфракрасным анализатором [Deuser, 1971]. Таким образом, были получены принципиально новые результаты по распределению РОУ в глубоководной части моря.

В марте–апреле 1988 г. нами во время 15 рейса НИС «Витязь» были получены данные по вертикальному распределению РОУ в местах восточного и западного круговоротов, которые по характеру распределения были идентичны распределению Дьюзера, но по значениям абсолютных концентраций в глубинных водах в два-три раза выше (рис. 2.3.1). Во-первых, такие расхождения могут быть связаны с тем, что пробы Дьюзера до проведения анализа не менее месяца хранились в стеклянных ампулах. Это могло привести к значительной сорбции ОВ на стенках сосудов. Во-вторых, нами анализ на содержание РОУ проводился методом персульфатного и УФ-окисления проб на борту судна непосредственно после их отбора [Агатова и др., 1989]. Образующийся при окислении  $\text{CO}_2$  регистрировался спектрофотометрически при длине волны 540 нм по ослаблению окраски раствора фенолфталеина. Считалось, что изменение окраски в результате подкисления пропорционально количеству поступившего в раствор  $\text{CO}_2$ . Специальными



**Рис. 2.3.1.** Вертикальное распределение растворенного органического углерода в водной толще Чёрного моря: 1 – [Скопинцев, 1975]; 2 – [Deuser, 1971]; 3 – [Агатова и др., 1989].

опытами было показано, что неорганические сульфиды не влияют на конечный результат определения РОУ. Однако нельзя исключить влияния органических сульфидов R-S-R, которые могут составлять 10–20% от восстановленных форм серы [Morper, Kieber, 1991]. Эти сульфиды легко окисляются до сульфонов R-SO<sub>2</sub>-R, обладающих повышенной кислотностью из-за сильного индуктивного эффекта SO<sub>2</sub>-группы. Вполне возможно, что при анализе глубоководных проб ослабление окраски раствора фенолфталеина происходило не только за счет выделения CO<sub>2</sub> при окислении ОВ, но и за счет образования сульфонов. В пользу последнего предположения говорит и тот факт, что при использовании в дальнейших исследованиях метода каталитического высокотемпературного сжигания РОВ, когда выделяющийся CO<sub>2</sub> фиксируется инфракрасным датчиком, как правило, в глубинных водах не обнаруживается таких высоких концентраций РОУ [Агатова и др., 2016].

Сотрудниками ВНИРО на основании полученных в двух рейсах данных (15-й рейс НИС «Витязь» в апреле 1988 г. и 24-й рейс НИС «Академик Книпович» в июне–июле 1989 г.) впервые были построены карты пространственного распределения C<sub>орг</sub> в Черном море (рис. 2.3.2). Карты очень схематичны, однако дают общее представление о содержании РОУ в прибрежной части и в кислородной зоне глубоководья Черного моря в этот период.

На картах распределения РОУ прежде всего бросается в глаза последовательное уменьшение его концентраций от устья Дуная до берегов Крыма. Очевидно, основным источником ОВ являются крупные реки (Днепр, Днестр, Буг, Дунай). Именно оттуда начинается постепенное уменьшение концентрации ОВ, следуя за ходом Основного Черноморского течения (ОЧТ). Средняя концентрация C<sub>орг</sub> в болгарских водах 667 мкМ, а в водах восточного побережья Черного моря – около 525 мкМ. На восточном берегу Крыма, в районе Судакской бухты концентрация C<sub>орг</sub> падает до 483–500 мкМ, а на западном берегу Крыма несколько

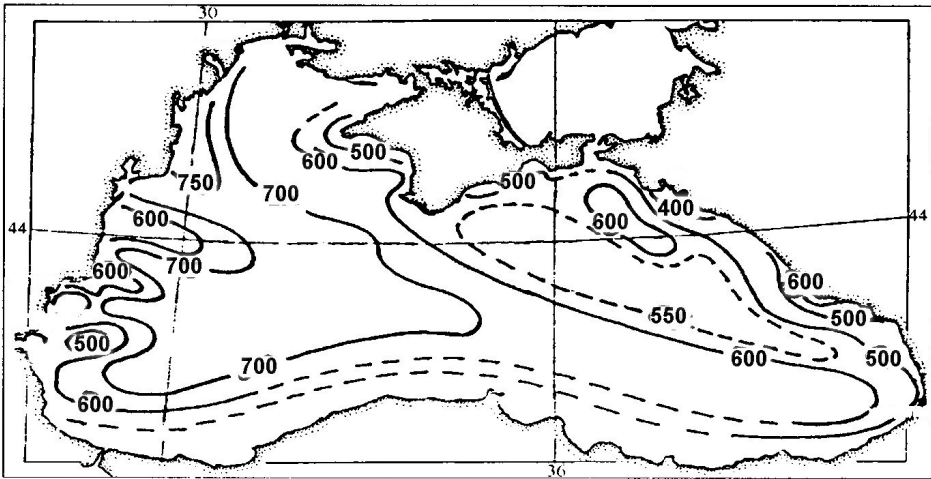


Рис. 2.3.2. Карта распределения РОУ (мкМ) в водах Черного моря в 1988–1989 гг.

возрастает до 542–592 мкМ. Для фотического слоя южной части моря в это же время (1986–1990 гг.) турецкими учеными приводятся более низкие значения концентраций РОУ: 158–208 мкМ [Tugrul, 1993].

В прибрежной зоне следует выделить самые мелководные зоны с глубиной до 10 м, на содержание ОВ в которых оказывает большое влияние как береговой сток, так и обмен вода–дно. Здесь, как правило, наблюдается уменьшение концентраций растворенного  $C_{\text{орг}}$  от поверхности ко дну, но разница в величинах невелика и составляет не более 42 мкМ.

В пределах ОЧТ отмечен поверхностный максимум растворенного и взвешенного  $C_{\text{орг}}$ , глубина залегания которого колеблется от 10 до 50 м в зависимости от сезона и района. Этот максимум совпадает с максимальными концентрациями хлорофилла «а». Ниже идет довольно равномерное распределение РОУ по всей вертикали.

Для глубоководной зоны Черного моря характерно неравномерное вертикальное распределение растворенного  $C_{\text{орг}}$  в верхнем 150-метровом слое, что определяется состоянием фито- и зоопланктонных сообществ. В период интенсивного фотосинтеза в поверхностных слоях возможны большие колебания концентраций РОУ (от 250 до 667 мкМ). Глубже 200 м наблюдается либо постепенное увеличение концентраций  $C_{\text{орг}}$ , либо их уменьшение. Аккумуляция ОВ в анаэробных водах Черного моря, вероятно, является как результатом накопления продуктов неполного окисления ОВ, поступающих сюда из аэробных вод, так и накопления продуктов происходящего в этих водах хемосинтеза [Агатова и др., 2016; Wakeham et al., 2007; Kaiser et al., 2017].

Необходимо отметить еще одну важную особенность вертикального распределения РОУ – уменьшение концентрации  $C_{\text{орг}}$  на глубине 100–200 м. Этот минимум был замечен еще В. Дьюзером [Deuser, 1971]. Существующий минимум характерен для субкислородного слоя, ниже же наблюдается довольно равномерное увеличение концентраций  $C_{\text{орг}}$  до дна, превышающее поверхностные концентрации в два-три раза (см. рис. 2.3.1). Этот минимум возможен за счет жизнедеятельности микроаэрофильных организмов, которые при концентрациях растворенного кислорода в воде около 0,3 мг  $O_2$ /л поглощают растворенные аминокислоты и моносахара со скоростью гораздо большей, чем аэробные и анаэробные бактерии [Seki, 1991].

Такие количественные различия между вышеприведенными результатами могут быть связаны не только с разными методами хранения, обработки проб воды и определения в них  $C_{\text{орг}}$ , но вполне возможно, что эти различия определяются и большими временными разрывами между исследованиями. Тогда можно предположить, что в результате антропогенного воздействия происходит накопление ОВ – за первые 10 лет увеличение в 2,5 раза (разница между данными Скопинцева и Дьюзера), а в течение следующих 20 лет в 3 раза (разница между данными Дьюзера и ВНИРО). Это объяснение имеет под собой основание.

Активная химизация сельского хозяйства и зарегулирование стока рек черноморского водосбора в 60-х годах прошлого столетия вызвали большие изменения не только в прибрежных экосистемах Черного моря, но и в экосистемах глубоководного бассейна. Анализируя изменения, произошедшие за последние 40 лет с показателями, характеризующими уровень первичной продукции (ПП) в открытых водах моря, авторы работы [Mikaelyan et al., 2013] пришли к выводу, что по продуктивности этот период нужно разделить на три части: 1) перед эвтрофикацией 1969–1983 гг., характеризуется средним уровнем биомассы фитопланктона в фотическом слое 3,3 г/м<sup>2</sup>; 2) высокая эвтрофированность 1984–1995 гг., средний уровень биомассы фитопланктона увеличился до 19,6 г/м<sup>2</sup>, т.е. в 6 раз и 3) после эвтрофикации 1996–2008 гг., средний уровень биомассы снизился до 10,6 г/м<sup>2</sup>, т.е. почти в 2 раза. Естественно, такие колебания в биомассе фитопланктона не могли не сказаться на концентрациях ОВ в этих водах. Определения и Б.А. Скопинцева, и В. Дьюзера были сделаны в период перед эвтрофикацией, тогда как приведенные выше данные ВНИРО были получены во время периода эвтрофикации.

Прежде всего эвтрофикация сказалась на содержании РОУ в кислородной зоне, концентрации которого здесь увеличились почти в 2 раза (см. рис. 2.3.1).

К сожалению, имеется мало работ по дальнейшему определению РОУ в глубоководной зоне моря от поверхности до дна. Американские ученые, исследуя вертикальное распределение  $C_{\text{орг}}$  в западном круговороте в мае–июне 2001 г. (постэвтрофикационный период), не получили увеличения концентраций РОУ в бескислородных водах. В среднем от поверхности до 2000 м их значения изменялись от 200 до 123 мкМ. При этом и на западном шельфе измеренные ими

величины не превышали 275 мкМ [Ducklow et al., 2007]. С этой точки зрения интересно сравнить результаты совместных исследований российских и немецких ученых по распределению РОУ и ВОУ в шельфовых и глубоководных районах, проведенных в ноябре 2013 г. на разрезе через все море от северо-запада до северо-востока во время 33-го рейса научно-исследовательского судна «Maria S. Merian» [Kaiser et al., 2017], и результаты исследований, проведенных в ноябре 2015 г. во время 81-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» на станциях полигона, совпадающих с районом глубоководных исследований на северо-западе в 2013 г. (43°22′–43°23′ с.ш.; 32°06′–32°48′ в.д.). В обоих случаях определение РОУ в отфильтрованных через стекловолнистые фильтры и подкисленных соляной кислотой пробах проводили методом высокотемпературного каталитического сожжения на приборах фирмы «Shimudzu». Однако разница была в хранении проб перед анализом. В первом случае они хранились в замороженном состоянии, а во втором – в холодильнике при температуре 5–6°C. По данным ноября 2013 г. следовало, что самые высокие концентрации РОУ (223 мкМ) в кислородной зоне были характерны для северо-западного шельфа, уменьшаясь к центру до средних значений 196 мкМ, а к северо-восточному шельфу – до средних значений 191 мкМ. Такие низкие концентрации РОУ в фотическом слое, вероятно, связаны с затухающей продукционной активностью фитопланктона в это время. По всему разрезу ниже оксиклина концентрации уменьшались до минимальных значений (114 мкМ). Однако к придонному слою они незначительно увеличивались (115–120 мкМ), на одной станции на северо-западе достигнув максимальных значений 176 мкМ  $C_{орг}$ . Исследователи связывают такое повышение концентраций в бескислородной зоне с интенсивностью хемосинтетических процессов здесь.

По данным 2015 г., полученным сотрудниками ВНИРО, в фотическом слое концентрации РОУ изменялись от 212 до 316 мкМ, уменьшаясь в районе оксиклина в пределах 193–244 мкМ  $C_{орг}$ . По всему столбу в сероводородной зоне эти концентрации распределялись очень неоднородно – от минимальных значений 168 мкМ до максимальных 322 мкМ. В придонном же слое концентрации РОУ могли либо уменьшиться, либо увеличиться в пределах 157–201 мкМ  $C_{орг}$  (рис. 2.3.3). Такое неравномерное распределение РОУ в сероводородной зоне, скорее всего, связано здесь с различной интенсивностью хемосинтетических процессов на разных горизонтах. Более же высокие средние концентрации РОУ, полученные в ноябре 2015 г., по сравнению с ноябрем 2013 г., могут быть связаны как с разными методами хранения проб перед анализом (частичная потеря РОУ при оттаивании), так и с возможно более высокой ПП в 2015 г.

Для всей шельфовой зоны большое значение имеет речной сток, влияние которого неоднозначно в зависимости от концентрации ОБ в приносимых водах. В результате формируются области как повышенного, так и пониженного содержания РОУ.



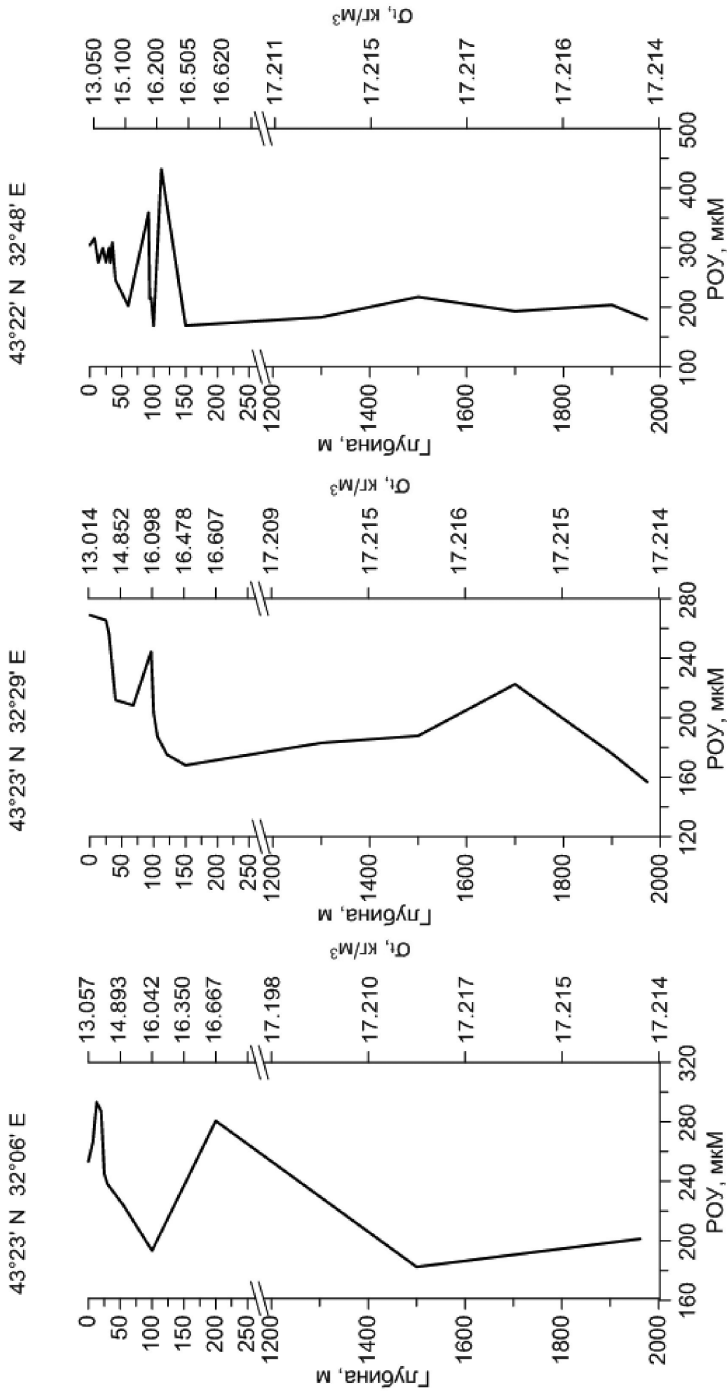


Рис. 2.3.3. Распределение PO<sub>4</sub> (мкМ) в глубоководной северо-западной части Черного моря (ноябрь, 2015).



Нами был проведен анализ изменчивости концентраций РОУ с семилетней периодичностью с 1989 по 2003 гг. на северо-восточном шельфе. В табл. 2.3.1 представлены данные по концентрации РОВ на мелководье, ограниченном 50-метровой изобатой.

Самые высокие концентрации РОВ и в поверхностном, и в придонном слое по всему побережью были в 1989 г. (период высокой эвтрофированностью). Максимальные концентрации характерны для Проливного района. Интересна тенденция уменьшения концентраций РОВ от Проливного района до района Туапсе–Магри,

Таблица 2.3.1

**Концентрации растворенного  $C_{орг}$  (мг/л) и основных биохимических компонентов РОВ (мг/л) в водах северо-восточного шельфа Черного моря в 1989, 1996 и 2003 гг.**

Район	Н, м	$C_{орг}$			Белки			Углеводы			Липиды		
		1989 лето	1996 осень	2003 лето	1989 лето	1996 осень	2003 лето	1989 лето	1996 осень	2003 лето	1989 лето	1996 осень	2003 лето
Пролив- ный район (I)	0	7,20	5,15	7,65	$\frac{0,085}{0,6}$	$\frac{0,102}{1,0}$	$\frac{0,138}{0,9}$	$\frac{1,78}{12,4}$	$\frac{2,26}{21,9}$	$\frac{1,88}{12,3}$	$\frac{2,34}{16,3}$	$\frac{0,26}{2,5}$	$\frac{1,97}{12,9}$
	Дно	6,63	3,36	5,22	$\frac{0,064}{0,5}$	$\frac{0,095}{1,4}$	$\frac{0,083}{0,8}$	$\frac{1,51}{11,4}$	$\frac{1,69}{25,1}$	$\frac{1,30}{12,5}$	$\frac{1,37}{10,3}$	$\frac{0,14}{2,0}$	$\frac{0,76}{7,3}$
Анапа- Б.Утрищ (II)	0	6,06	3,10	4,07	$\frac{0,118}{1,0}$	$\frac{0,110}{1,8}$	$\frac{0,080}{1,0}$	$\frac{2,21}{18,2}$	$\frac{1,90}{30,6}$	$\frac{1,03}{12,7}$	$\frac{1,20}{9,9}$	$\frac{0,45}{7,3}$	$\frac{1,28}{15,7}$
	Дно	5,43	2,45	3,35	$\frac{0,108}{1,0}$	$\frac{0,104}{2,1}$	$\frac{0,072}{1,1}$	$\frac{2,27}{20,9}$	$\frac{1,54}{31,4}$	$\frac{0,86}{12,8}$	$\frac{1,52}{14,0}$	$\frac{0,39}{8,0}$	$\frac{1,47}{21,9}$
Ново- рос- сийск- Гелен- джик (III)	0	5,10	2,40	3,66	$\frac{0,104}{1,0}$	$\frac{0,068}{1,4}$	$\frac{0,060}{0,8}$	$\frac{1,52}{14,9}$	$\frac{2,25}{46,9}$	$\frac{1,60}{21,9}$	$\frac{2,22}{21,8}$	$\frac{0,43}{9,0}$	$\frac{1,42}{19,4}$
	Дно	5,00	2,00	3,70	$\frac{0,089}{0,9}$	$\frac{0,056}{1,4}$	$\frac{0,035}{0,5}$	$\frac{0,89}{8,9}$	$\frac{1,88}{47,0}$	$\frac{1,40}{18,9}$	$\frac{1,17}{11,7}$	$\frac{1,22}{30,5}$	$\frac{1,27}{17,2}$
Туапсе- Магри (IV)	0	4,58	3,56	4,00	$\frac{0,082}{0,9}$	$\frac{0,041}{0,6}$	$\frac{0,051}{0,6}$	$\frac{1,33}{14,5}$	$\frac{2,79}{39,2}$	$\frac{1,28}{16,0}$	$\frac{1,32}{14,4}$	$\frac{0,72}{10,1}$	$\frac{0,79}{9,9}$
	Дно	4,40	-	3,53	$\frac{0,035}{0,4}$	-	$\frac{0,067}{0,9}$	$\frac{1,66}{18,9}$	-	$\frac{0,86}{12,2}$	$\frac{0,66}{7,5}$	-	$\frac{0,77}{10,9}$
Сочи- Адлер (V)	0	5,22	4,12	-	$\frac{0,174}{1,7}$	$\frac{0,127}{1,5}$	-	$\frac{1,73}{16,6}$	$\frac{2,22}{26,9}$	-	$\frac{1,17}{11,2}$	$\frac{2,33}{28,3}$	-
	Дно	5,22	4,30	-	$\frac{0,250}{2,4}$	$\frac{0,142}{1,7}$	-	$\frac{0,65}{6,2}$	$\frac{2,19}{25,5}$	-	$\frac{1,13}{10,8}$	$\frac{2,69}{31,3}$	-

В числителе – концентрации, мг/л; в знаменателе – % от РОВ.

которую можно проследить по данным всех трех годов. В районе же Сочи–Адлер они начинают возрастать. Это увеличение наиболее значительно в 1996 г. В этом году значения концентраций в районе Сочи–Адлер были почти в 2 раза выше по сравнению с минимальными концентрациями в районе Новороссийск–Геленджик. Выделяющееся пятно повышенных концентраций в Проливной зоне связано с влиянием вод Азовского моря. Очевидно, это влияние распространяется вплоть до Анапы. В прибрежной зоне можно наблюдать самые большие перепады в концентрациях не только от региона к региону, но и по сезонам в одном регионе. Довольно трудно дать количественную оценку межсезонной изменчивости концентраций РОВ, т.к. слишком велика их межгодовая изменчивость. Однако по имеющимся данным можно говорить о тенденции уменьшения содержания РОВ в 1,5–3 раза от лета к осени как в поверхностном, так и в придонном слое. Вероятно, снижение к осени интенсивности ПП приводит к уменьшению концентраций РОВ в этот сезон. Например, в районе Каркинитского залива в мае концентрации РОУ были почти в 5 раз выше, чем в августе.

Как правило, концентрации РОВ в придонном слое ниже концентраций в поверхностных водах. Особенно эта закономерность хорошо выражена в Проливном районе и в районе Анапа – Б. Утриш. Вероятно, уменьшение концентрации РОВ в придонном слое происходит за счет его частичной сорбции на поверхности осадка [Агатова и др., 2005].

Дальнейшие исследования распределения ОВ в восточной части Черного моря в 2010–2012 гг. показало малую пространственно-временную изменчивость концентраций РОУ по сравнению с 2003 г. в фотическом слое, но большую изменчивость его концентраций в субкислородной и бескислородной зонах (рис. 2.3.4, 2.3.5). Как правило, в субкислородной зоне происходит уменьшение концентраций ОВ по сравнению с фотическим слоем, которые затем с глубиной либо уменьшаются, либо увеличиваются, вероятно, в зависимости от интенсивности вертикального перемешивания, интенсивности хемосинтеза и антропогенной нагрузки на регион. К сожалению, за последнее десятилетие очень мало данных по распределению РОУ в глубинных водах в районах западного и восточного циклонических круговоротов. Поэтому нет (и, вероятно, и не может быть), однозначного ответа на вопрос, накапливается ли ОВ в сероводородной зоне или его концентрации уменьшаются по мере увеличения глубины.

Особенностью ОВ Черного моря является низкое содержание в нем взвешенного  $S_{орг}$ , который составляет не более 5% от содержания растворенного. Наибольший вклад ВОУ имеет место в верхнем 100-метровом слое, а затем, вплоть до 2000 м, его содержание уменьшается и не превышает 1% от РОУ. В фотическом слое пелагиали концентрации взвешенного  $S_{орг}$  варьируют от 6,5 до 29,2 мкМ С. Причем, так же как и для РОУ, наблюдается подповерхностный максимум этих концентраций, глубина залегания которого изменяется в пределах 10–50 м. Этот максимум, величина и положение которого изменяется в зависимости от сезона,

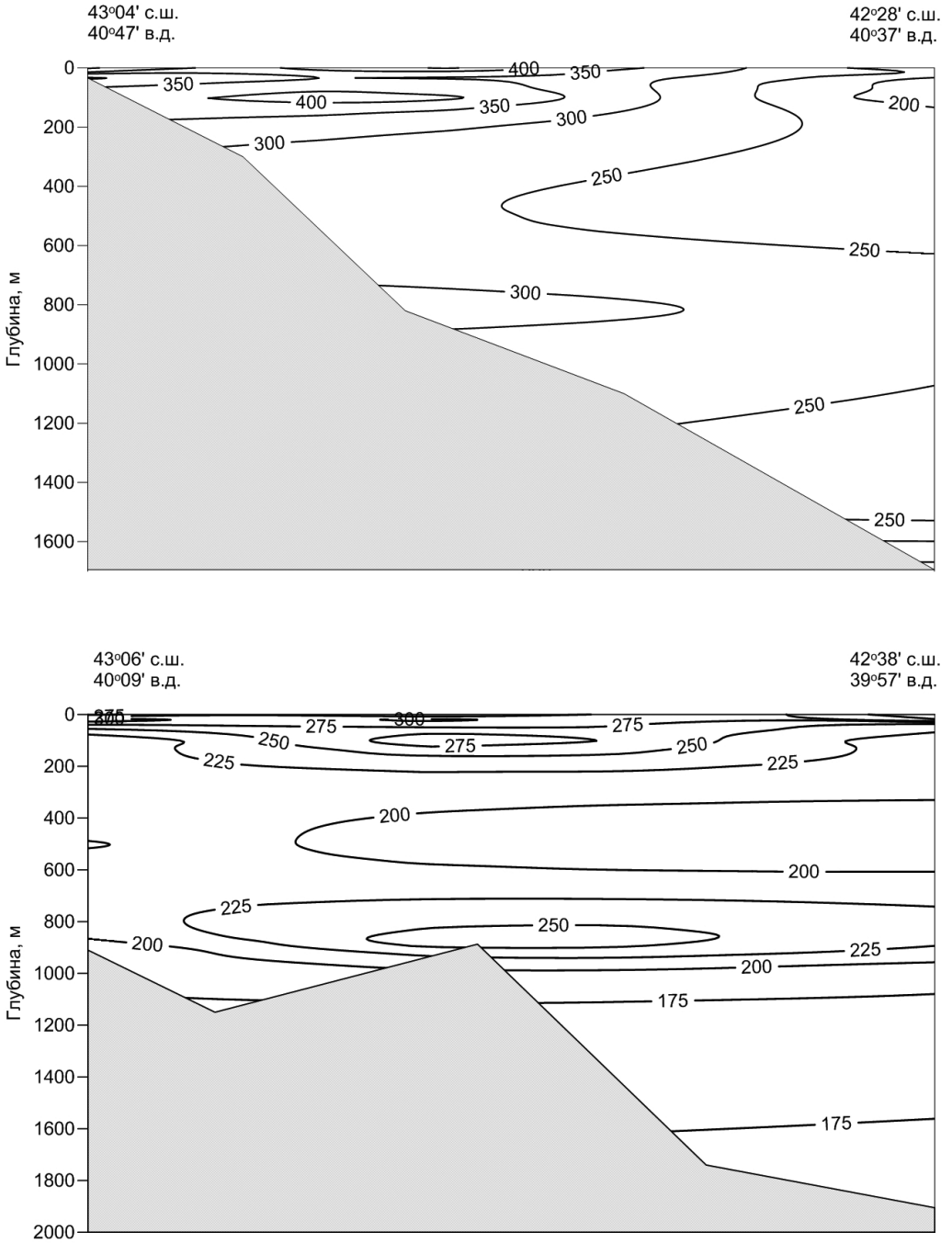


Рис. 2.3.4. Распределение РОУ (мкМ) на разрезах по Черному морю (май–июнь 2012 г.)

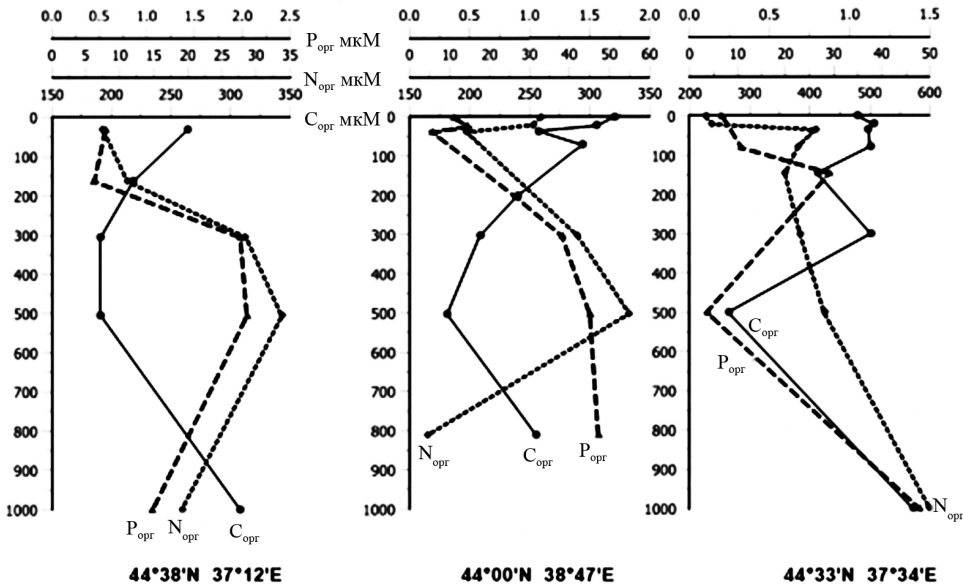
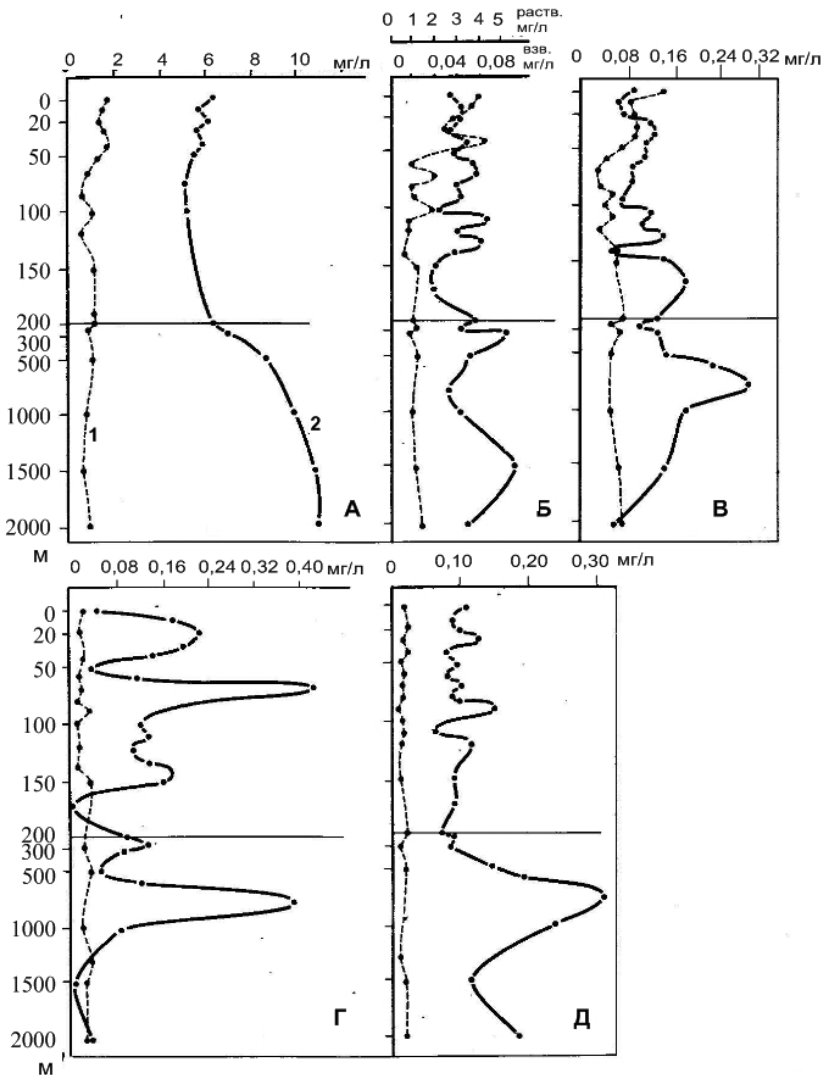


Рис. 2.3.5. Вертикальное распределение растворенного  $C_{орг}$ ,  $N_{орг}$  и  $P_{орг}$  в пелагиали Черного моря в 2010–2012 гг.

совпадает с максимальными концентрациями хлорофилла «а». Как правило, второй максимум  $VOU$  характерен для субкислородной зоны. Вертикальное распределение  $VOU$  ниже субкислородной зоны, отличается от распределения  $POU$ , и значения его концентраций уменьшаются с глубиной (рис. 2.3.6). Разные физико-химические свойства  $ОВ$  верхнего 100-метрового слоя и более глубоких слоев указывают на то, что значительная часть  $ОВ$  Черного моря находится не в истинно растворенном, а в мелкодисперсном и коллоидном состояниях, позволяющих легко осуществлять переход взвесь–раствор [Агацова, 2017].

Однако в мелководных районах и в районах, подверженных влиянию речного стока, концентрации  $VOU$  могут резко возрастать. Мезомасштабное пространственное распределение взвешенного  $C_{орг}$  в шельфовой зоне аналогично распределению растворенного  $C_{орг}$  – уменьшение концентраций от устья Дуная к кавказско-крымскому региону. Как правило, в прибрежных водах максимальные концентрации  $VOU$  характерны для поверхностных вод и уменьшаются в 1,5–3 раза в придонном слое [Агацова и др., 2005]. Различия между концентрациями взвешенного  $C_{орг}$  в поверхностных и придонных водах в летние месяцы выше, чем в осенние. Это можно объяснить более интенсивным первичным



**Рис. 2.3.6.** Вертикальное распределение ВОР, РОУ и основных биохимических компонентов в пелагиали Черного моря: А – ВОР и РОУ; Б – углеводы; В – белок; Г – НК и азотистые основания; Д – липиды. 1 – взвешенные вещества ( $1 \cdot 10^{-1}$ ); 2 – растворенные вещества.

продуцированием ОВ летом, нежели осенью. Интересно, что только в Проливном районе и незначительно в районе Анапа – Б. Утриш летом вклад ВОВ в общее содержание ОВ выше, чем осенью, причем эта закономерность обнаруживается только в поверхностных водах, тогда как в остальных исследованных районах

процентное содержание ВОВ в общем ОВ осенью больше, чем летом, как в поверхностных, так и в придонных водах. Вероятно, в динамически активном Пролитном районе содержание ВОВ в основном зависит от интенсивности ПП и скорости роста и развития фитопланктона, а в других районах, особенно в местах культивирования беспозвоночных, концентрация ВОВ в большой степени зависит от роста и развития микрогетеротрофов (табл. 2.3.2).

Особняком следует выделить фронтальную зону между шельфовыми водами и водами ОЧТ, в которой скапливаются взвешенные частицы, что приводит к увеличению в этом районе концентраций ВОУ.

Анализ многолетней изменчивости концентраций ВОУ в поверхностном слое в западном и восточном районах моря в течение 1978–1995 гг. показал, что в период перед эвтрофикацией концентрации ВОУ во все сезоны по всей исследованной акватории были в 1,5–4 раза ниже, чем в период эвтрофикации (табл. 2.3.3). Особенно большие различия были характерны для лета. В период же после эвтрофикации (1998–2010 гг.) эти концентрации снизились, и средние их величины колебались от 12,1 до 1,2 мкМ  $C_{орг}$  в зависимости от продуктивности фитопланктона [Кукушкин, 2014].

Следует отметить, что авторы работы [Kaiser et al., 2017] во время рейса в ноябре 2013 г. получили более низкие средние значения концентраций ВОУ в фотическом слое на разрезе от северо-западного до северо-восточного шельфа, а именно – 9,04 мкМ. При этом минимальные концентрации (6,66 мкМ) были установлены в пелагиали восточного сектора, а максимальные (27,48 мкМ) – на северо-западном шельфе. Вертикальное распределение ВОУ по всей исследованной акватории было довольно равномерным с постепенным уменьшением ко дну в 3–5 раз.

*Растворенный и взвешенный  $N_{орг}$* , так же как и  $C_{орг}$ , в водах Черного моря распределены очень неравномерно. Значения их концентраций изменяются от 3,1 до 80,3 мкМ  $N_{орг}$  для РОВ и от 0,3 до 8,5 мкМ  $N_{орг}$  для ВОВ [Лукашев, 1973; Скопинцев, 1975; Агатова и др., 1989; Кукушкин, 2014; Ducklow et al., 2007; Kaiser et al., 2017]. К сожалению, этих данных очень мало. Высокие концентрации и растворенного, и взвешенного  $N_{орг}$ , как правило, характерны для прибрежных экосистем и для фронтальной зоны между шельфовыми водами и водами ОЧТ. В пелагиали концентрации  $N_{орг}$  максимальны в слое максимума хлорофилла «а», уменьшаясь к субкислородной зоне. В анаэробной зоне происходит неравномерное увеличение концентраций  $N_{орг}$  с увеличением глубины (см. рис. 2.3.5). Не обязательно вертикальное распределение  $N_{орг}$  совпадает с вертикальным распределением  $C_{орг}$ . Это, вероятно, связано с разным биохимическим составом ОВ на разных глубинах.

Интересно, что в период перед эвтрофикацией концентрации взвешенного  $N_{орг}$  в поверхностном слое, так же как и ВОУ, во все сезоны по всей исследованной акватории были в 1,2–6 раз ниже, чем в период эвтрофикации (см. табл. 2.3.3). Особенно большие различия были характерны для лета в восточном регионе.

Таблица 2.3.2  
**Концентрации взвешенного  $S_{орг}$  (мг/л) и основных биохимических компонентов ВОВ (мг/л) в водах северо-восточного шельфа Черного моря в 1989, 1996 и 2003 гг.**

Район	Н, м	$S_{орг}$			Белки			Углеводы			Липиды		
		1989 лето	1996 осень	2003 лето	1989 лето	1996 осень	2003 лето	1989 лето	1996 осень	2003 лето	1989 лето	1996 осень	2003 лето
Против- ный район (I)	0	0,462	0,270	0,429	0,313 33,9	0,155 38,8	0,306 35,7	0,365 39,5	0,091 22,8	0,232 27,0	0,172 18,6	0,007 1,8	0,153 17,8
	Дно	0,170	0,122	0,217	0,131 38,5	0,148 60,7	0,195 44,9	0,128 37,6	0,064 26,2	0,073 16,8	0,021 6,2	0,010 4,1	0,101 23,3
Анапа – Б.Утриш (II)	0	0,339	0,167	0,291	0,202 29,8	0,172 51,5	0,188 32,3	0,281 41,4	0,093 27,8	0,097 16,7	0,130 19,2	0,021 6,3	0,182 31,3
	Дно	0,218	0,106	0,103	0,084 19,3	0,110 51,9	0,069 33,5	0,140 32,1	0,062 29,2	0,027 13,1	0,156 35,8	0,014 6,6	0,076 36,9
Новорос- сийск- Геленд- жик (III)	0	0,320	0,218	0,156	0,256 40,0	0,208 47,7	0,121 38,8	0,200 31,3	0,115 26,4	0,053 17,0	0,110 17,2	0,045 10,3	0,092 29,5
	Дно	0,150	0,151	0,125	0,110 36,7	0,180 59,6	0,103 41,2	0,095 31,7	0,075 24,8	0,037 14,8	0,085 28,3	0,006 2,0	0,072 28,8
Туапсе – Магри (IV)	0	0,300	0,321	0,212	0,184 30,7	0,298 46,4	0,174 41,0	0,144 24,0	0,149 23,2	0,064 15,1	0,121 20,2	0,110 17,1	0,120 28,3
	Дно	0,250	-	0,131	0,134 26,8	-	0,101 38,5	0,127 25,4	-	0,039 14,9	0,050 10,0	-	0,084 32,1
Сочи – Адлер (V)	0	0,322	0,206	-	0,188 29,2	0,176 42,7	-	0,171 26,6	0,131 31,8	-	0,050 7,8	0,050 12,1	-
	Дно	0,230	0,191	-	0,168 36,5	0,201 52,6	-	0,147 32,0	0,109 28,5	-	0,060 13,0	0,020 5,2	-

В числителе – концентрации, мг/л; в знаменателе – % от ВОВ.



**Таблица 2.3.3**  
**Сезонные изменения содержания компонентов взвешенного органического**  
**вещества в поверхностном слое в глубоководных районах Черного моря**  
**в периоды 1978–1990 (1), 1991–1995 (2) гг.**

Район	Сезон	Период	СВОВ, мкМ	NBOB, мкМ	$C_{\text{хл}},$ мг/м <sup>3</sup>	C/N	C/хл «а»
Западный	Зима	1	14,8 ± 4,0	1,67 ± 0,52	1,58 ± 0,82	9,2 ± 2,2	138 ± 78
		2	16,7	1,94	1,55 ± 0,17	8,6	131
	Весна	1	11,3 ± 3,7	1,26 ± 0,65	0,44 ± 0,31	11,9 ± 6,7	774 ± 542
		2	14,7 ± 6,9	2,17 ± 1,38	0,54 ± 0,37	7,8 ± 2,3	318 ± 123
	Лето	1	9,9 ± 1,8	1,23 ± 0,61	0,21 ± 0,17	10,8 ± 7,6	1060 ± 635
		2	27,3 ± 8,7	3,18 ± 1,58	0,89 ± 0,22	9,4 ± 2,2	395 ± 102
Осень	1	12,1 ± 4,9	1,21 ± 0,47	0,52 ± 0,24	10,3 ± 3,8	228 ± 106	
	2	11,3 ± 3,5	1,43 ± 0,63	0,47 ± 0,23	8,9 ± 4,1	378 ± 185	
Восточный	Зима	1	16,2 ± 4,2	1,73 ± 0,42	1,15 ± 0,78	9,5 ± 1,9	127 ± 51
		2	15,9 ± 2,2	2,71 ± 0,86	1,32 ± 0,62	6,2 ± 1,2	130 ± 24
	Весна	1	11,3 ± 3,1	2,4 ± 0,1	0,3 ± 0,25	5,6 ± 0,2	600 ± 100
		2	17,8 ± 6,0	2,72 ± 0,8	0,36 ± 0,19	7,6 ± 2,3	872 ± 606
	Лето	1	11,1 ± 2,3	1,35 ± 0,55	0,16 ± 0,12	10,2 ± 6,4	1286 ± 430
		2	43,5 ± 20,2	8,3 ± 6,3	2,33 ± 1,03	7,0 ± 3,0	301 ± 110
Осень	1	10,9 ± 7,6	0,97 ± 0,54	0,44 ± 0,2	9,1 ± 3,5	152 ± 64	
	2	16,1 ± 4,7	2,2 ± 0,35	0,61 ± 0,31	9,2 ± 2,1	200 ± 52	

1 – период перед эвтрофикацией и начала эвтрофикации; 2 – период эвтрофикации.

Таблица взята из работы [Кукушкин, 2014].

Изменения же концентраций растворенного  $N_{\text{орг}}$  в зависимости от изменения трофности черноморской экосистемы не так однозначны. Например, анализ изменчивости содержания растворенного  $N_{\text{орг}}$  в водах северо-западного шельфа

с 70-х годов прошлого века до 2005 г., сделанный турецкими учеными, показал, что в 1-й период эти средние величины равнялись 10 мкМ, во 2-й – 25 мкМ и в 3-й – 40 мкМ [Oguz, Velikova, 2010]. В то же время, американские исследователи в июне 2001 г. (постэвтрофикационный период) для вод северо-западного шельфа получили значения концентраций растворенного  $N_{\text{орг}}$ , не превышающие 16 мкМ, а для пелагиали в районе западного круговорота – 12 мкМ [Ducklow et al., 2007]. По нашим данным, в период эвтрофикации в зависимости от сезона на восточном шельфе эти концентрации изменялись в пределах 21–42 мкМ, а в районе восточного круговорота – от 21 до 28 мкМ. После выхода экосистемы из эвтрофикации средние величины концентраций растворенного  $N_{\text{орг}}$  в зависимости от сезона колебались в пределах 14–20 мкМ на шельфе и 16–23 мкМ в фотическом слое глубоководья. На шельфе максимальные концентрации были характерны для осени, а в пелагиали – для лета. По данным [Kaiser et al., 2017], в ноябре 2013 г. средние концентрации растворенного  $N_{\text{орг}}$  в фотическом слое были равны 10 мкМ, изменяясь по всей исследованной акватории в пределах 8–13 мкМ  $N_{\text{орг}}$ , средние же значения (1,1 мкМ) концентраций взвешенного азота здесь изменялись в пределах 0,92–2,71 мкМ. Причем, концентрации и растворенных, и взвешенных форм азота были максимальны на северо-западном шельфе, а минимальны на востоке центрального бассейна.

Исходя из вышеприведенных данных все-таки можно сказать, что в постэвтрофикационный период в водах Черного моря уменьшаются концентрации не только взвешенных, но и растворенных форм  $N_{\text{орг}}$ .

*Органический фосфор.* К сожалению, данных по распределению органических форм фосфора в водах Черного моря еще меньше, чем для  $N_{\text{орг}}$ . Следует отметить, что физико-химические состояния существования этих форм в морской воде очень разнообразны и легко могут переходить из одного состояния в другое [Karl, 2014]. Поэтому здесь мы приводим суммарные значения концентраций, включающих и растворенный, и взвешенный  $P_{\text{орг}}$ . Пределы изменения этих концентраций значительны (0,08–3,54 мкМ Р) и зависят от периода, сезона, региона и зоны отбора проб воды [Скопинцев, 1975; Сапожников, 1991; Лапина, Селин, 1994].

Самые низкие концентрации характерны для периода перед эвтрофикацией. В это время средние величины  $P_{\text{орг}}$  изменялись в кислородной зоне от 0,08 до 0,39 мкМ Р, в субкислородной – от 0,15 до 0,65 мкМ Р, а в анаэробной – от 0,55 до 0,81 мкМ Р, как правило, увеличиваясь с глубиной.

Сотрудниками ВНИРО самые высокие значения концентраций  $P_{\text{орг}}$  зафиксированы в конце периода эвтрофикации в пелагиали. На шельфе осенью концентрации изменялись в пределах 0,11–0,89 мкМ Р/л, незначительно уменьшаясь в придонном слое. В то же время в глубоководных районах колебания этих значений были гораздо больше: от 0,14 до 3,54 мкМ Р в фотическом слое, от 0,01 до 1,05 мкМ Р в субкислородной зоне и от 0,34 до 3,28 мкМ Р в сероводородной зоне (см. рис. 2.3.4).

Следует отметить, что в постэвтрофикационный период уменьшаются средние концентрации не только  $P_{\text{орг}}$ , но и неорганических фосфатов (см. рис. 2.3.4; табл. 2.3.4).

Таблица 2.3.4

**Изменение концентраций  $P_{\text{орг}}$  мкМ в разные сезоны 2010-2012 гг.  
в восточной части Черного моря**

Район	Горизонт	Зима	Весна	Лето	Осень
Шельф	Поверхность (0–50 м)	<u>0.10-0.79</u> 0.45	<u>0.09-0.30</u> 0.22	<u>0.05-1.61</u> 0.45	<u>0.15-1.19</u> 0.56
	Придонный слой	<u>0.14-0.69</u> 0.44	<u>0.11-0.29</u> 0.22	<u>0.02-1.59</u> 0.51	<u>0.32-1.65</u> 0.73
Пелагиаль	Фотический слой	<u>0.11-0.64</u> 0.33	<u>0.09-0.23</u> 0.16	<u>0.13-1.24</u> 0.66	<u>0.15-1.04</u> 0.50
	Субкислородная зона	<u>0.02-0.55</u> 0.27	<u>0.13-0.39</u> 0.22	<u>0.11-1.22</u> 0.69	<u>0.24-1.30</u> 0.54
	Сероводородная зона	–	<u>0.11-1.32</u> 0.48	<u>0.21-2.43</u> 1.15	<u>0.19-1.21</u> 0.56

В числителе – пределы изменения значений, в знаменателе – среднее значение.

Анализируя представленные данные, можно сделать два основных вывода: 1) И на шельфе, и в пелагиали величины концентраций  $P_{\text{орг}}$  значительно изменяются по сезонам. Минимальные средние значения характерны для весны, а максимальные – для лета и осени. Причем такая закономерность прослеживается не только на шельфе, но и во всех зонах глубоководья. 2) Как правило, концентрации  $P_{\text{орг}}$  уменьшаются от фотического слоя к субкислородной зоне, значительно возрастая в сероводородных водах. Увеличение концентраций  $P_{\text{орг}}$  в бескислородной зоне, вероятно, в основном определяется интенсивностью процессов хемосинтеза здесь. В недавней работе было показано, что взвешенный  $P_{\text{орг}}$ , образованный в сероводородных водах, является основным источником фосфора для осадков [Dijkstra et al., 2018].

Так же как и для  $N_{\text{орг}}$ , не обязательно вертикальное распределение  $P_{\text{орг}}$  совпадает с вертикальным распределением  $C_{\text{орг}}$ . Большие диапазоны несинхронных изменений концентраций  $C_{\text{орг}}$ ,  $N_{\text{орг}}$  и  $P_{\text{орг}}$  в водах Черного моря обуславливают и значительные колебания величин молярных отношений  $C/N$  и  $C/P$  в растворенном ОВ. Значения  $C/N$  по всей исследованной акватории изменялись от 2 до 88, а  $C/P$  – от 93 до 8687 в зависимости от сезона и региона. Самые высокие значения этих соотношений, как правило, были характерны для фотического слоя шельфа и пелагиали, а самые низкие – для сероводородной зоны. Такие большие колебания значений и  $C/N$ , и  $C/P$  наблюдали во все три периода различного трофического состояния экосистемы Черного моря.

Следует отметить, что во взвешенном ОВ значения этих соотношений близки к классическим значениям Редфильда.

## Пространственное распределение основных биохимических компонентов РОВ и ВОВ

Основным биохимическим компонентом РОВ в Черном море, так же как и в других морях, являются углеводы, а ВОВ – белки. Распределение взвешенных белков и нуклеиновых кислот до некоторой степени является отражением скопления микропланктона на детрите, а неравномерности распределения растворенных и взвешенных углеводов в фотическом слое связаны в основном с неравномерностями распределения фитопланктона.

Формирование «глубинного» (30–40 м) максимума фитопланктона в пелагиали [Суханова и др., 1991] дает максимальные значения концентраций растворенных и взвешенных углеводов на этих горизонтах. На границе субкислородной и сероводородной зоны (около 200 м) концентрация взвешенных углеводов имеет минимальные значения (0,02 мг/л) и практически не меняется вплоть до 2000 м. Растворенные углеводы сохраняют значительную неравномерность распределения и в глубинных слоях. Причем после 150 м происходит даже увеличение их концентрации (см. рис. 2.3.6). По характеру установленное А.И. Агатовой и Н.И. Торгуновой в марте–апреле 1988 г. распределение практически не отличается от осеннего распределения растворенных и взвешенных углеводов, установленного ранее Н.Д. Стариковой и О.Г. Яблоковой [1972]. Однако средние концентрации растворенных углеводов как в верхних, так и в глубинных слоях в 3 раза меньше, чем по данным [Агатова, Торгунова, 1991], тогда как концентрации взвешенных углеводов примерно такие же. Эти расхождения могут быть связаны как с разными сезонами отбора проб, так и с разными периодами трофического состояния экосистемы Черного моря.

Вертикальное распределение растворенных и взвешенных белков аналогично распределению углеводов (см. рис. 2.3.6). Концентрации взвешенных белков, определенные в 1988 г. в период эвтрофикации, превышают в 2–3 раза концентрации взвешенных аминокислот, установленные Н.Д. Стариковой и Л.И. Коржиковой [1972] в период до эвтрофикации. Однако в слое 100–200 м вертикальное распределение растворенных аминокислот такое же, как полученное позже распределение белка.

Здесь хотелось бы обратить внимание на два факта. Во-первых, только в верхнем 30-метровом слое концентрация взвешенного белка превышает концентрацию растворенного; далее, особенно после субкислородного слоя, концентрация растворенного белка намного выше взвешенного. Это, вероятно, связано с превышением биомассы пикопланктона в этих водах над биомассой нанопланктона. Во-вторых, увеличение концентрации белка в слое 150–2000 м указывает на значительные скопления здесь микрожизни. Ранее [Лопухин, 1987; Karl, 1978] было показано, что в пределах бескислородной зоны Черного моря (200–2100 м) кон-

центрация АТФ в 5–10 раз выше, чем на этих же глубинах других морей, содержащих кислород. Исходя из данных по вертикальному распределению растворенных биохимических компонентов в слое 200–2000 м, максимальные скопления микроорганизмов и в Западном, и в Восточном циклонических круговоротах должны быть на горизонте 800 м, так как там зафиксированы максимальные концентрации белков, НК и липидов (см. рис. 2.3.6).

Интересно, что вертикальное распределение взвешенных НК практически повторяет вертикальное распределение взвешенного белка от поверхности до 2000 м, тогда как растворенные формы этих компонентов часто находятся в противофазе, особенно в верхнем 200-метровом слое. Часто величины концентраций растворенных НК значительно превышают величины растворенных белков. Такое соотношение белков и НК в растворе дает основание предположить, что воды Черного моря богаты микоплазмами и вирусами.

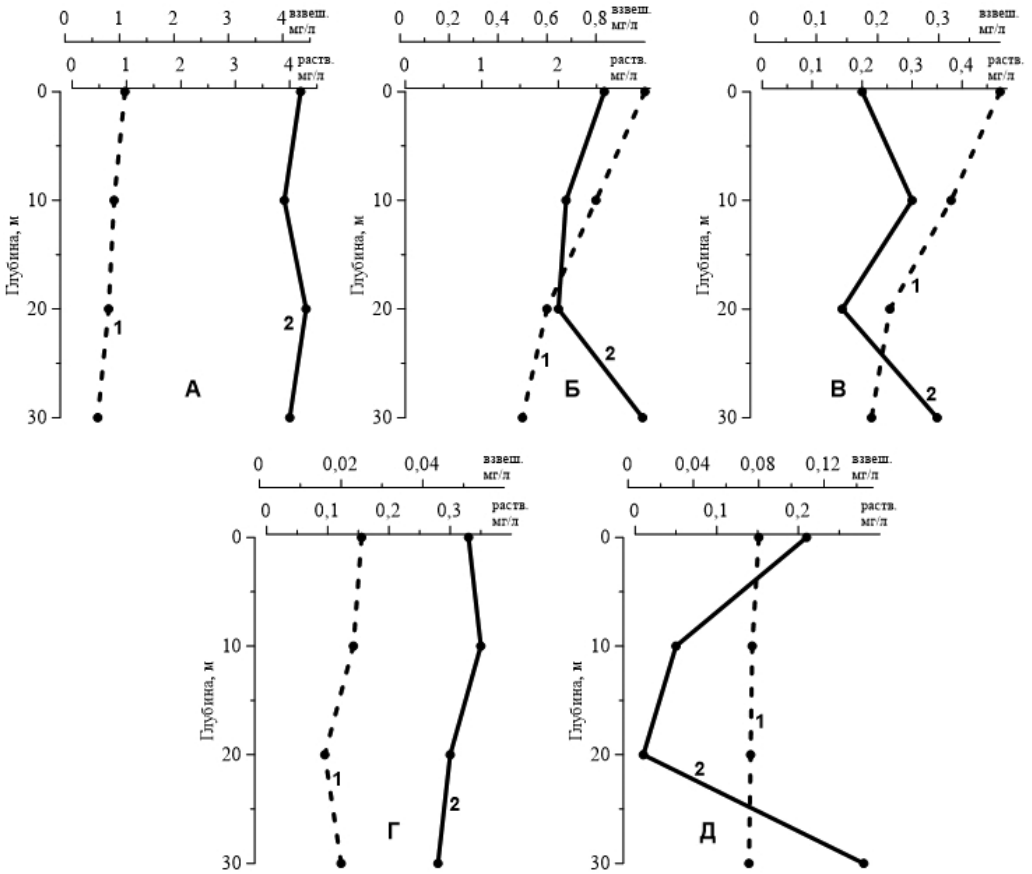
На мелководных же станциях (рис. 2.3.7) концентрации взвешенного белка выше, чем концентрации растворенного. Соотношение белок/НК во взвеси, так же как и в глубоководных районах, равно 4–5, но в поверхностных водах и в придонном слое все-таки концентрация НК выше, чем белка.

По всем основным биохимическим компонентам верхний 30-метровый слой глубоководных районов богаче, чем мелководных, за исключением растворенных липидов. В мелководных районах концентрация их примерно в 2 раза выше, чем в глубоководных (см. рис. 2.3.6, 2.3.7). Это может быть отражением антропогенного воздействия, поэтому соотношение липиды/белок дает возможность судить о степени загрязненности ОВ данного региона.

Для всех районов Черного моря характерно значительное превышение концентрации растворенных липидов над взвешенными. Особенно эти различия велики в прибрежных водах и в водах сероводородной зоны. Ниже оксиклина относительный вклад белка в ВОВ увеличивается, а липидов уменьшается. На границе субкислородной и сероводородной зоны значительно изменяется состав белка, т.к. увеличивается отношение пиррол/индол [Coban-Yildiz et al., 2006].

В состав черноморских РОВ входит большое количество низкомолекулярных соединений, например, amino- и трикарбоновых кислот, низкомолекулярных сахаров, органических тиосоединений. В пелагиали часто концентрации этих веществ увеличиваются в сероводородной зоне. Здесь обнаружен целый ряд неизвестных аминов и карбонилсодержащих соединений, которые указывают на то, что в глубинных водах Черного моря обитают уникальные анаэробные бактерии, возможно, с новыми путями метаболизма ОВ [Mopper, Kieber, 1991].

Биохимическая неоднородность ОВ особенно хорошо проявляется как на западном, так и на восточном шельфе моря. РОВ и ВОВ болгарского шельфа богаты липидами, концентрации которых в растворе часто превышают концентрации углеводов. В июле–августе 1990 г. здесь значения концентраций растворенных липидов колебались в пределах 1,5–3,0 мг/л, а взвешенных – в пределах 0,40–1,00



**Рис. 2.3.7.** Вертикальное распределение ВОУ, РОУ и основных биохимических компонентов на шельфе Черного моря: А – ВОУ и РОУ; Б – углеводы; В – белок; Г – НК и азотистые основания; Д – липиды. 1 – взвешенные вещества; 2 – растворенные вещества.

мг/л. Максимальные концентрации характерны для прибрежных вод, что лишний раз подтверждает их значительную загрязненность. Однако на восточном шельфе от Анапы до Батуми концентрации растворенных липидов в 1,5–2 раза ниже, чем на западном (0,5–2,0 мг/л), а взвешенных – в 2–5 раз ниже (0,075–0,20 мг/л). При этом на северо-западном шельфе во взвеси и концентрации белка, и концентрации углеводов тоже были в 2 раза выше, чем концентрации соответствующих компонентов во взвеси кавказского шельфа, концентрации же этих компонентов в растворе были несколько выше на восточном шельфе. Можно предположить, что загрязнение западного шельфа приводит к увеличению концентраций ВОВ и всех

его основных биохимических компонентов главным образом за счет интенсивного развития микроорганизмов на ОВ, поступающих сюда со стоком рек. В устьях рек Дуная, Днепра и Днестра обнаружены повышенные концентрации мочевины (5–8 мкМ). Например, развитие «красного прилива» в районе Варны, которое мы наблюдали летом 1989 г., резко увеличило концентрации всех (и растворенных, и взвешенных) биохимических компонентов, но особенно взвешенных углеводов и белков – до 3,0 мг/л и до 5 мг/л, соответственно [Agatova, Sapozhnikov, 1998].

Однако, исключая экстремальные случаи, по биохимическому составу ОВ западного шельфа мало отличается от ОВ восточного. Во всех районах кавказского побережья основными биохимическими компонентами растворенного ОВ являются углеводы и липиды (6–49% и 2–31%, соответственно). Содержание белка редко превышает 2%. Летом сумма основных биохимических компонентов составляет 20–40% от РОВ как в поверхностном, так и в придонном слое, что указывает на значительный вклад в РОВ в это время низкомолекулярных соединений, например, аминокислот, ди- и трикарбоновых кислот и мочевины. Осенью вклад в РОВ основных биохимических компонентов увеличивается за счет повышения концентрации углеводов, а иногда и липидов (район Сочи–Адлер) и составляет 40–80% от РОВ. Следует отметить, что возрастание вклада основных биохимических компонентов в РОВ в это время происходит не только в результате увеличения концентрации того или иного компонента, но и за счет снижения общей концентрации растворенного ОВ (см. табл. 2.3.1).

Во всех водах основными биохимическими компонентами ВОВ являются белки и углеводы (19–61% и 13–41%, соответственно). Как правило, на шельфе максимальных значений вклад белков в ВОВ достигает осенью в придонном слое. Иногда летом значительный вклад в ВОВ (свыше 30%) вносят липиды, особенно в придонном слое. Следует отметить, что в первых трех рассматриваемых районах летом концентрации как растворенных, так и взвешенных липидов во много раз выше, чем осенью. В районе же Туапсе–Магри концентрации этих компонентов по сезонам практически не изменяются, тогда как в районе Сочи–Адлер осенью значительно возрастает концентрация растворенных липидов (табл. 2.3.1, 2.3.2). Вероятно, летом на содержание липидов в Пролитном районе, в районе Анапа – Б. Утриш и Новороссийск–Геленджик большое влияние оказывает интенсивное суходождение, которое загрязняет воды углеводородами топлива и маслами. С этой точки зрения самым чистым участком на северо-восточном побережье Черного моря является участок Туапсе–Магри. Содержание НК и азотистых оснований редко превышает 10%. Однако в местах интенсивного культивирования мидий в районе Туапсе–Магри летом вклад НК и азотистых оснований в ВОВ достигает 18% в поверхностных водах и более 20% в придонных. По-видимому, в это время идет интенсивное развитие микрогетеротрофов на метаболитах мидий.

В отличие от РОВ, и летом, и осенью сумма основных биохимических компонентов во взвеси составляет 75–99% от ВОВ как в поверхностном, так и в при-



донном слое, что указывает на незначительное содержание в ВОВ низкомолекулярных соединений, таких как свободные аминокислоты и ди- и трикарбоновые кислоты [Агатова и др., 2005].

Следует отметить, что как в мелководных, так и в глубоководных районах Черного моря не только в кислородной, но и в сероводородной зоне происходит интенсивное преобразование ОВ микроорганизмами с помощью различных ферментов. На шельфе для защиты от разного рода загрязнений увеличивается роль организмов, способных с высокой скоростью утилизировать разнообразные химические вещества [Агатова, 2017].

## Заключение

Данные по содержанию и элементному составу ОВ, полученные в разные сезоны и годы (с 1988 и по 2015 гг.) как в шельфовом, так и в глубоководном районе Черного моря, показали, что самые высокие концентрации как РОВ, так и ВОВ характерны для периода высокой эвтрофированности моря (1989–1995 гг.).

Анализ изменчивости концентраций РОУ с семилетней периодичностью с 1989 по 2003 гг. на северо-восточном шельфе показал, что самые высокие концентрации РОВ и в поверхностном и в придонном слое по всему побережью были в 1989 г. (период высокой эвтрофированности). Максимальные концентрации характерны для Проливного района. Тенденция уменьшения концентраций РОВ от Проливного района до района Туапсе–Магри прослеживается по данным всех трех годов. В районе же Сочи–Адлер они начинают возрастать. Это увеличение наиболее значительно в 1996 г. В этом году значения концентраций в районе Сочи–Адлер были почти в 2 раза выше по сравнению с минимальными концентрациями в районе Новороссийск–Геленджик. Выделяющееся пятно повышенных концентраций в Проливной зоне связано с влиянием вод Азовского моря. Это влияние распространяется вплоть до Анапы. В прибрежной зоне можно наблюдать самые большие перепады в концентрациях не только от региона к региону, но и по сезонам в одном регионе. Довольно трудно дать количественную оценку межсезонной изменчивости концентраций РОУ, т.к. слишком велика их межгодовая изменчивость. Однако по имеющимся данным можно говорить о тенденции уменьшения содержания растворенного ОВ в 1,5–3 раза от лета к осени как в поверхностном, так и в придонном слое. Вероятно, снижение к осени интенсивности ПП приводит к уменьшению концентраций РОУ в этот сезон. Например, в районе Каркинитского залива в мае концентрации РОУ были почти в 5 раз выше, чем в августе. Как правило, концентрации РОВ в придонном слое ниже концентраций в поверхностных водах. Особенно эта закономерность хорошо выражена в Проливном районе и в районе Анапа – Б. Утриш. Вероятно, уменьшение концентрации РОВ в придонном слое происходит за счет его частичной сорбции на поверхности осадка.

Дальнейшие исследования распределения ОВ в восточной части Черного моря в 2010–2012 гг. показало малую пространственно-временную изменчивость концентраций РОУ по сравнению с 2003 г. вдоль кавказского шельфа.

Особенностью ОВ Черного моря является, как правило, низкое содержание в нем взвешенного  $C_{\text{орг}}$ , который составляет не более 5% от содержания растворенного. Однако в мелководных районах и в районах, подверженных влиянию речного стока, концентрации ВОУ могут резко возрастать. Как правило, в прибрежных водах максимальные концентрации ВОУ характерны для поверхностных вод и уменьшаются в 1,5–3 раза в придонном слое. Различия между концентрациями ВОУ в поверхностных и придонных водах в летние месяцы выше, чем в осенние. Это можно объяснить более интенсивным первичным продуцированием ОВ летом, нежели осенью. Интересно, что только в Проливном районе и незначительно в районе Анапа – Б. Утриш летом вклад ВОВ в общее содержание ОВ выше, чем осенью, причем эта закономерность обнаруживается только в поверхностных водах, тогда как в остальных исследованных районах процентное содержание ВОВ в общем ОВ осенью больше, чем летом, как в поверхностных, так и в придонных водах. Вероятно, в динамически активном Проливном районе содержание ВОВ в основном зависит от интенсивности первичного продуцирования и скорости роста и развития фитопланктона, а в других районах, особенно в местах культивирования беспозвоночных, концентрация ВОВ в большой степени зависит от роста и развития микрогетеротрофов.

Особняком следует выделить фронтальную зону между шельфовыми водами и водами ОЧТ, в которой скапливаются взвешенные частицы, что приводит к увеличению в этом районе концентраций ВОУ.

К сожалению, очень мало данных по распределению РОУ в глубинных водах. Поэтому до сих пор нет однозначного ответа на вопрос, накапливается ли ОВ в сероводородной зоне, или его концентрации уменьшаются по мере увеличения глубины.

Для глубоководной зоны Черного моря характерно неравномерное вертикальное распределение РОУ в верхнем 150-метровом слое, что определяется состоянием фито- и зоопланктонных сообществ. В период интенсивного фотосинтеза в поверхностных слоях возможны большие колебания концентраций растворенного  $C_{\text{орг}}$  (от 250 до 666 мкМ). Глубже 200 м наблюдается либо постепенное увеличение концентраций  $C_{\text{орг}}$ , либо уменьшение этих значений в зависимости от подтока босфорских вод, интенсивности вертикального перемешивания, интенсивности хемосинтеза и антропогенной нагрузки на регион. Также неоднородно в этих водах вертикальное распределение концентраций  $N_{\text{орг}}$  и  $P_{\text{орг}}$ , что обуславливает большие отклонения молярных отношений  $C/N$  и  $C/P$  в РОВ от классических значений по Редфелду.

Необходимо отметить еще одну важную особенность вертикального распределения РОУ – уменьшение концентрации  $C_{\text{орг}}$  на глубине 100–200 м. Существующие

ший минимум характерен для субкислородного слоя. Этот минимум возможен за счет жизнедеятельности микроаэрофильных организмов, которые при концентрациях растворенного кислорода в воде около 0,3 мг O<sub>2</sub>/л поглощают растворенные аминокислоты и моносахара со скоростью гораздо большей, чем чистые аэробные и анаэробные бактерии.

Основным биохимическим компонентом РОВ являются углеводы, а ВОВ – белки. При большом загрязнении значительный вклад в биохимический состав обеих фракций могут вносить липиды. Помимо этого в состав черноморского РОВ входит значительное количество низкомолекулярных соединений, например, amino- и трикарбоновых кислот, низкомолекулярных сахаров, органических тиосоединений. В пелагиали часто концентрации этих веществ увеличиваются в сероводородной зоне. Здесь обнаружен целый ряд неизвестных аминов и карбонилсодержащих соединений, которые указывают на то, что в глубинных водах Черного моря обитают уникальные анаэробные бактерии, возможно, с новыми путями метаболизма ОВ.

Наибольший вклад ВОУ в ОВ имеет место в верхнем 100-метровом слое, а затем его содержание уменьшается и не превышает 1% от РОУ. В фотическом слое пелагиали концентрации взвешенного С<sub>орг</sub> варьируют от 8,3 до 29,2 мкМ. Причем, так же как и для РОУ, наблюдается подповерхностный максимум этих концентраций, глубина залегания которого изменяется в пределах 10–50 м. Этот максимум, величина и положение которого изменяется в зависимости от сезона, совпадает с максимальными концентрациями хлорофилла «а». Как правило, второй максимум взвешенного С<sub>орг</sub> характерен для субкислородной зоны. Вертикальное распределение ВОУ ниже субкислородной зоны отличается от распределения РОУ, и значения его концентраций уменьшаются с глубиной. Разные физико-химические свойства ОВ верхнего 100-метрового слоя и более глубинных слоев указывают на то, что значительная часть ОВ Черного моря находится не в истинно растворенном, а в мелкодисперсном и коллоидном состояниях, позволяющих легко осуществлять переход взвесь–раствор.

Таким образом, из накопленных к настоящему времени данных по распределению растворенного и взвешенного органического вещества в пелагиали Черного моря нет, да вероятно и не может быть однозначного ответа на вопрос, накапливается ли ОВ в сероводородной зоне или его концентрации уменьшаются по мере увеличения глубины. Ясно одно, что сероводородная зона является местом активного синтеза, преобразования и деструкции органического вещества.