

# ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПЕЛАГИЧЕСКОГО СООБЩЕСТВА

## 2

Арашкевич Е.Г.<sup>1</sup>, Луппова Н.Е.<sup>1</sup>,  
Подымов О.И.<sup>1</sup>, Часовников В.К.<sup>1</sup>

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ЭТАПА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной целью данного этапа было исследование пространственно-временной изменчивости структуры и функционирования пелагической экосистемы, а также факторов, определяющих эти изменения; изучение степени взаимодействия/изоляции шельфовых и глубоководных пелагических экосистем; оценка влияния локальных климатических условий на состав, обилие и жизненные циклы ключевых компонентов биоты.

Исследование пелагической экосистемы включало в себя три основных блока:

- гидрофизический блок – анализ распределения температуры, солёности, условной плотности, флуоресценции и мутности;
- гидрохимический блок – определение концентрации растворенного кислорода, сероводорода, общей щёлочности, фосфатов, валового фосфора, силикатов, нитритов, нитратов, аммония, валового азота и рН;
- биологический блок – анализ содержания хлорофилла-а (Chl-a) в воде, определение состава, численности и биомассы мезозoopланктона и желетелого макрозоопланктона.

Судовой мониторинг выполнялся на стандартном 9-мильном разрезе от берега до глубины 1500 м на траверзе Голубой бухты (рис. 2.1). На каждой станции разреза проводились гидрофизические исследования, отбирались гидрохимические и

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. E-mail: [alena@ocean.ru](mailto:alena@ocean.ru)

биологические пробы. Цифрами на схеме обозначены глубины станций: 10 м (бухта), 25 м (внутренний шельф), 50 м (срединный шельф), 100 м (внешний шельф), 500 м и глубже (континентальный склон).

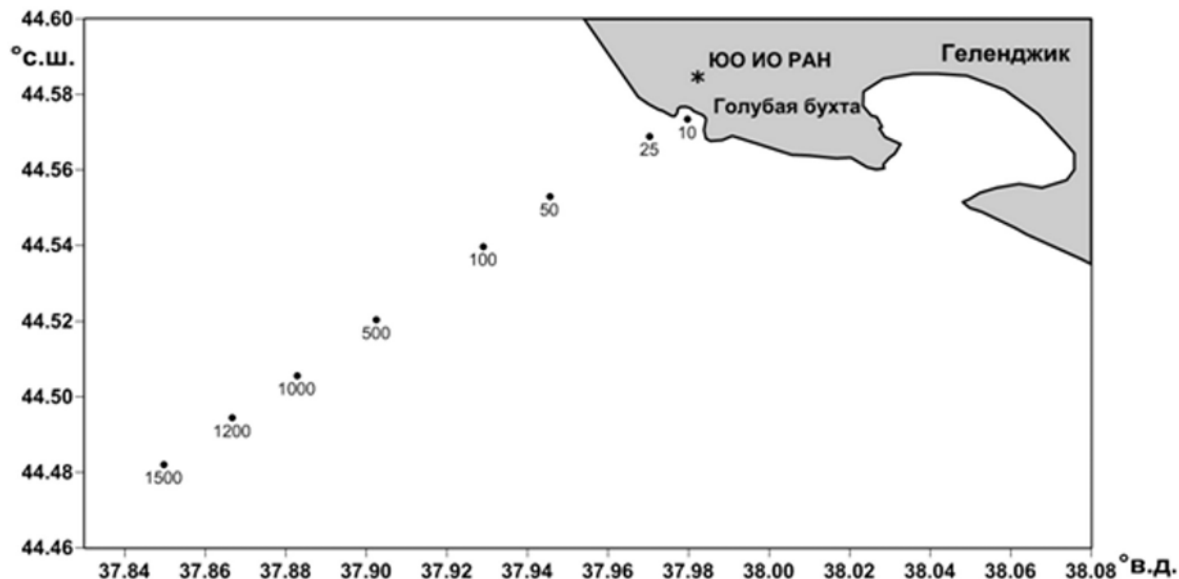


РИС. 2.1.

Схема расположения станций на 9-мильном мониторинговом разрезе (цифрами указаны глубины станций)

### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

За период с 13 апреля по 22 декабря 2017 г. с использованием МНИС «Ашамба» было выполнено 14 судовых экспедиционных выходов.

**Гидрофизические исследования** выполнялись CTD-зондом SBE 19 plus, установленным на гидрофизический комплекс «Розетта» (SBE 55), оснащенный шестью батометрами Нискина для отбора гидрохимических проб и работающий в режиме онлайн-регистрации данных измерений через бортовой блок SBE 33. Для измерения флуоресценции Chl-a и мутности морской воды использовался флуориметр WET Labs ECOFL, подключенный напрямую к CTD-зонду. На станциях с глубинами 10–100 м зондирование производилось до дна, на станциях с глубинами 500–1500 м – до глубины 300 м.

Отбор **гидрохимических проб** в море проводился пластиковыми батометрами Нискина и осуществлялся непосредственно после их подъема на палубу в соответствии

с принятыми методиками. Пробы отбирались через тайгоновые прозрачные шланги, позволявшие контролировать отсутствие пузырька воздуха при заполнении склянок. Сразу после отбора проводилась фиксация проб на растворенный кислород, сероводород и аммонийный азот. На определение биогенных элементов (силикаты, фосфаты, формы азота, валовый азот, фосфор и др.) воду отбирали в пластиковую посуду (объемом 500 мл) без консервации.

Анализ проб выполнялся на берегу в лаборатории химии ЮО ИО РАН.

Растворенный кислород определялся по модифицированному методу Винклера с использованием полуавтоматической титровальной установки «Digitrate 810» (США).

Величина pH определялась потенциометрическим методом с помощью ионометров И-500 (Россия) и WDW-330 i (Германия).

Щелочность определялась методом прямого титрования в береговой лаборатории.

Фосфаты определялись фотометрически по методу Морфи-Райли.

Силикаты определялись фотометрически при концентрациях ниже 60 мкМ в пробе по методу Королева с образованием голубого молибденового комплекса, при более высоких концентрациях – по желтому комплексу.

Валовый/органический фосфор определялся сожжением до фосфатов на водяной бане с персульфатом калия.

Аммонийный азот определялся по методу Сэджи-Солорзано с образованием фенол-гипохлоритного комплекса.

Нитритный азот (нитриты) определялся колориметрически. Предел чувствительности определения элемента составлял 0.0005 мг/л.

Нитратный азот (нитраты) определялся колориметрически после его восстановления на кадмиевых колонках до нитритного азота. Предел чувствительности определения элемента составлял 0.005 мг/л.

Валовый/органический азот определялся по методу Вальдеррама сжиганием в автоклаве при температуре 105 °С в течение 40 минут с разложением до нитратов.

Сероводород определялся фотометрически при небольших концентрациях с диметил-пара-финелендиамином, а при больших концентрациях – иодометрическим титрованием с использованием титраторов Metrohm (Германия) и АТП-02 (Россия).

Общий фосфор измерен методом мокрого сожжения с персульфатом калия по РД 52.10.243-92.

Фотометрические измерения проводились на фотоколориметрах КФК 3 (Россия) и Nach (Германия). Для приготовления реактивов использовался деионизатор Simplicity 185 D-301.

**Биологические пробы** для измерения концентрации фитопигментов (Chl-a и феофитина) были собраны батометрами Нискина комплекса Rosett Sea Bird 911 plus на глубинах 0, 10, 20 50 и 70 м, а также в слое максимума флюоресценции, определенного предварительным зондированием STD-зондом, оснащенным датчиком флюоресценции.

Для измерения концентрации Chl-a воду фильтровали через фильтры GF/F. Экстракцию проводили 90%-м ацетоном при температуре +4 °С в темноте в течение 24 ч. Флуоресценция экстрактов была измерена на флюориметре Trilogy Turner Designs (США). Концентрацию Chl-a и феопигментов рассчитывали по формуле для *in vitro* флюориметрии (Strickland, Parsons, 1968).

Сбор проб зоопланктона проводили сетными вертикальными ловами от дна до поверхности на шельфовых станциях и от границы сероводородного слоя (условная плотность 16.2) до поверхности на глубоководных станциях. Мезозоопланктон собирали сетью Джеди (площадь входного отверстия 0.1 м<sup>2</sup>, размер ячеей 180 мкм). Пробы фиксировали 4%-м раствором формалина, нейтрализованного бурой. Для определения индивидуального веса животных в единицах углерода использовали формулы, приведенные в (Arashkevich et al., 2014). Разбор и анализ зоопланктонных проб проводился под бинокулярными стереомикроскопами Leica S6E и Leica MZ4 (Германия) по стандартной методике.

Макрзоопланктон собирали конической сетью с площадью входного отверстия 0.5 м<sup>2</sup> и размером ячеей 500 мкм. Немедленно после отбора пробу переливали в просторный сосуд с морской водой. Желетельный макрзоопланктон (гребневиков и медуз) подсчитывали и измеряли в «живой» пробе. Животных поочередно переносили в прозрачный сосуд и измеряли их размер линейкой, приложенной ко дну сосуда: у гребневиков длину тела измеряли от аборального органа до рта; у медуз измеряли диаметр купола. Вес тела в единицах углерода определяли по формулам зависимости содержания углерода от длины тела, полученным для гребневиков *Mnemiopsis leidyi* и *Beroe ovata* (Finenko et al., 2003) и медуз *Aurelia aurita* (Anninsky, 2009) Черного моря.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### Пространственно-временная изменчивость гидрофизических параметров в 2017 г.

Относительно холодная зима 2016-2017 гг. и последующая холодная весна привели к тому, что стабильный прогрев верхнего слоя начался только в конце апреля. Первая судовая экспедиция, отметившая сформировавшийся верхний квазиоднородный слой, состоялась 16 мая, толщина ВКС на срединной станции разреза с глубиной 500 м на этот момент была 10 м. Дальнейшая динамика ВКС в целом была типична для наблюдаемого района (рис. 2.2): некоторое уменьшение ВКС параллельно с ростом его температуры и начиная с июля увеличение толщины и температуры, вплоть до конца августа. Потом последовало осеннее остывание: ВКС продолжил увеличиваться в толщине, при этом температура слоя постепенно уменьшалась. Мощные норд-осты в конце сентября – начале октября (рис. 2.3) на протяжении недели основательно перемешали верхний слой, увеличив глубину ВКС до 50 м. Тем не менее, спустя всего несколько дней стратифи-

кация частично восстановилась, и глубина перемешанного слоя уменьшилась до 28 м с небольшим ростом его температуры.

Максимум температуры воды на мониторинговом разрезе был зафиксирован 15 августа и составил 27.9 °С, причем это была не только поверхностная температура – прогрев всего ВКС на тот момент превышал 27 °С.

2017 год был первым, начиная с 2013, когда мы наблюдали сформировавшийся холодный промежуточный слой. В 2013 г. ХПС представлял собой остаточное явление после аномально холодной зимы 2011-2012 гг., а в 2014-2016 гг. ХПС не наблюдался вовсе. В 2017 г., во время первого мониторингового рейса, толщина этого слоя составила 83 метра, а температура в ядре ХПС опускалась менее 7.2 °С. В дальнейшем толщина слоя скачкообразно снижалась, а его температура постепенно росла. Но, тем не менее, ХПС продолжал наблюдаться во время всех мониторинговых выходов, в том числе поздней осенью.

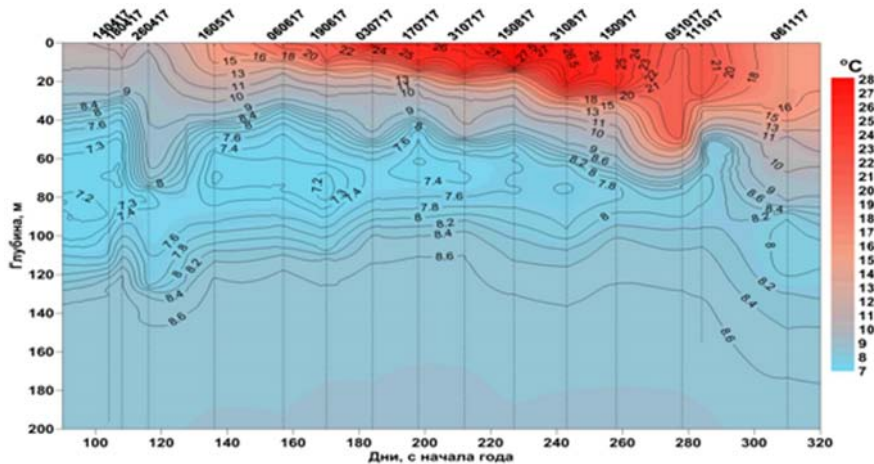
Толщина термоклина в 2017 г. была несколько меньше, чем в предыдущие годы, что вполне объяснимо появлением ХПС, «подпирающим» теплый слой снизу. 31 июля был отмечен его локальный максимум (толщина 28 м), и дальнейшая изменчивость была скачкообразной (зависела от динамики течений и ветрового воздействия) вплоть до последнего судового выхода 6 ноября, когда толщина термоклина составила 29 м. Последний факт, видимо, связан с теплой осенью, замедленным процессом остывания верхнего слоя и достаточно интенсивным вертикальным турбулентным обменом, обусловленным заметно усилившимся в конце сентября ветровым воздействием.

Сезонная изменчивость солености в ВКС 2017 г. в целом была довольно типичной. По мере прогрева верхнего слоя (и затруднения перемешивания), речной сток и осадки постепенно опресняли верхний слой, и поверхностная соленость постепенно снижалась от 18.1 psu 14 апреля до 16.7 psu к 3 июля (рис. 2.2б). На ближайших к берегу точках (в пределах одной морской мили) соленость в этот день опускалась еще ниже, вплоть до 16.5 psu. Как уже отмечалось ранее (Подымов, Зацепин, 2016), данное опреснение не связано напрямую с локальными осадками, фиксируемыми местной метеостанцией. Вероятней всего, оно является результатом вдольбереговой адвекции более пресной воды из других районов (Сочи-Сухуми), где в период паводка (апрель-май) имеет место обильный речной сток.

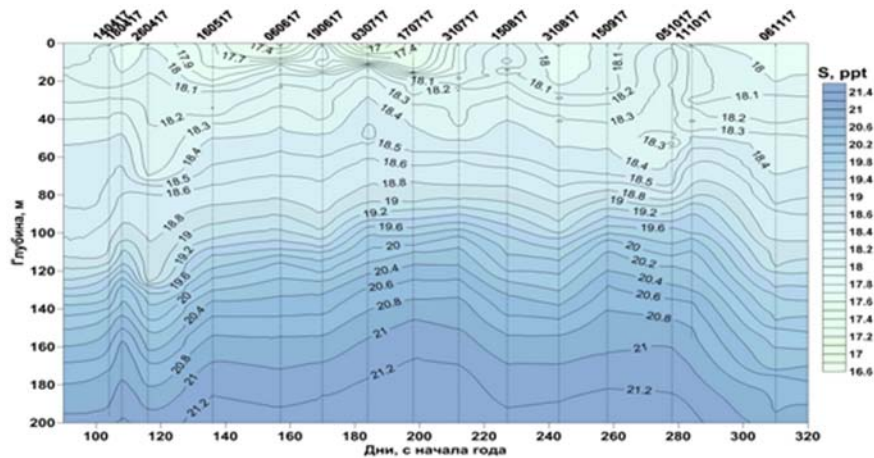
Усиливающийся солнечный прогрев и сопутствующее ему увеличение испарения, а также турбулентное вовлечение в ВКС более соленой воды снизу приводят к росту солености в ВКС, начавшемуся со второй половины июля. В целом из-за жаркого лета и теплой осени соленость в верхнем слое была выше, чем в предыдущие годы, и начиная с августа она уже не опускалась ниже 17.9 psu, достигнув максимума 5 октября (18.2 psu).

Изменчивость плотности воды в верхнем слое практически повторяет годовой ход температуры (рис. 2.2в), поскольку температурный вклад в плотность воды в ВКС является основным и значительно превышает вклад солености. Минимальная условная

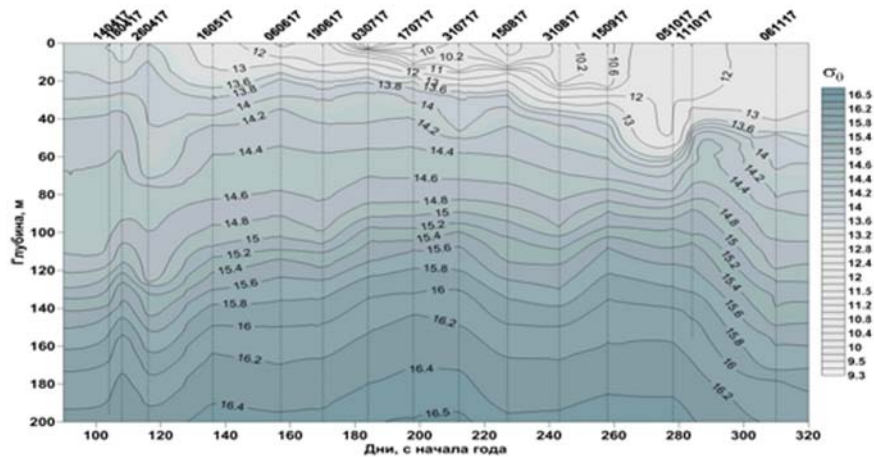
А



Б

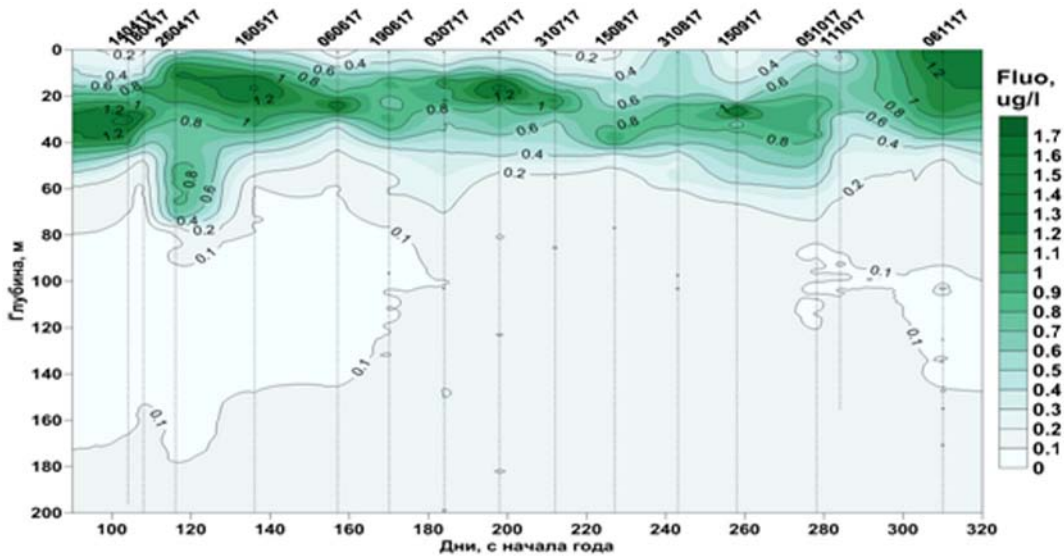


В





Г



Д

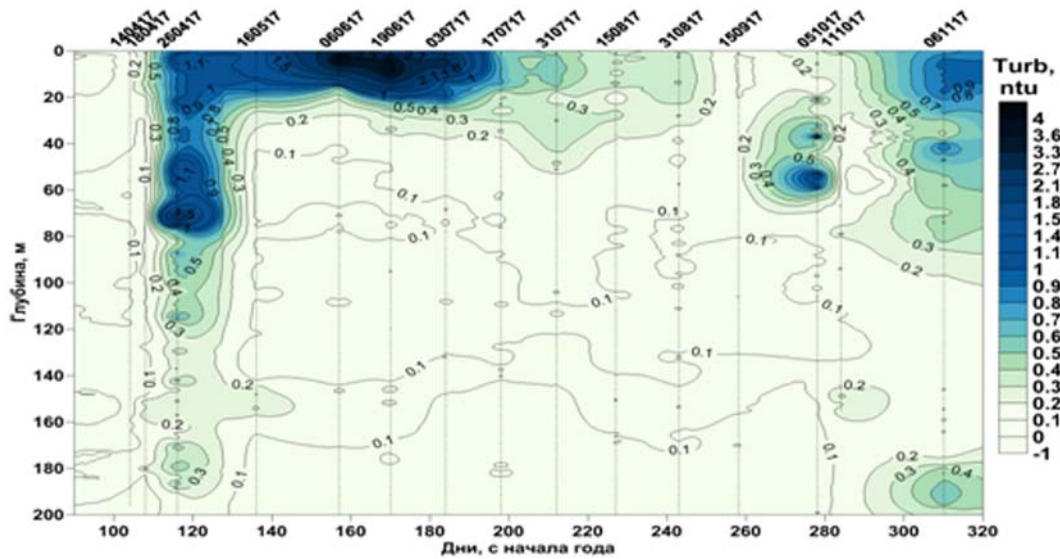
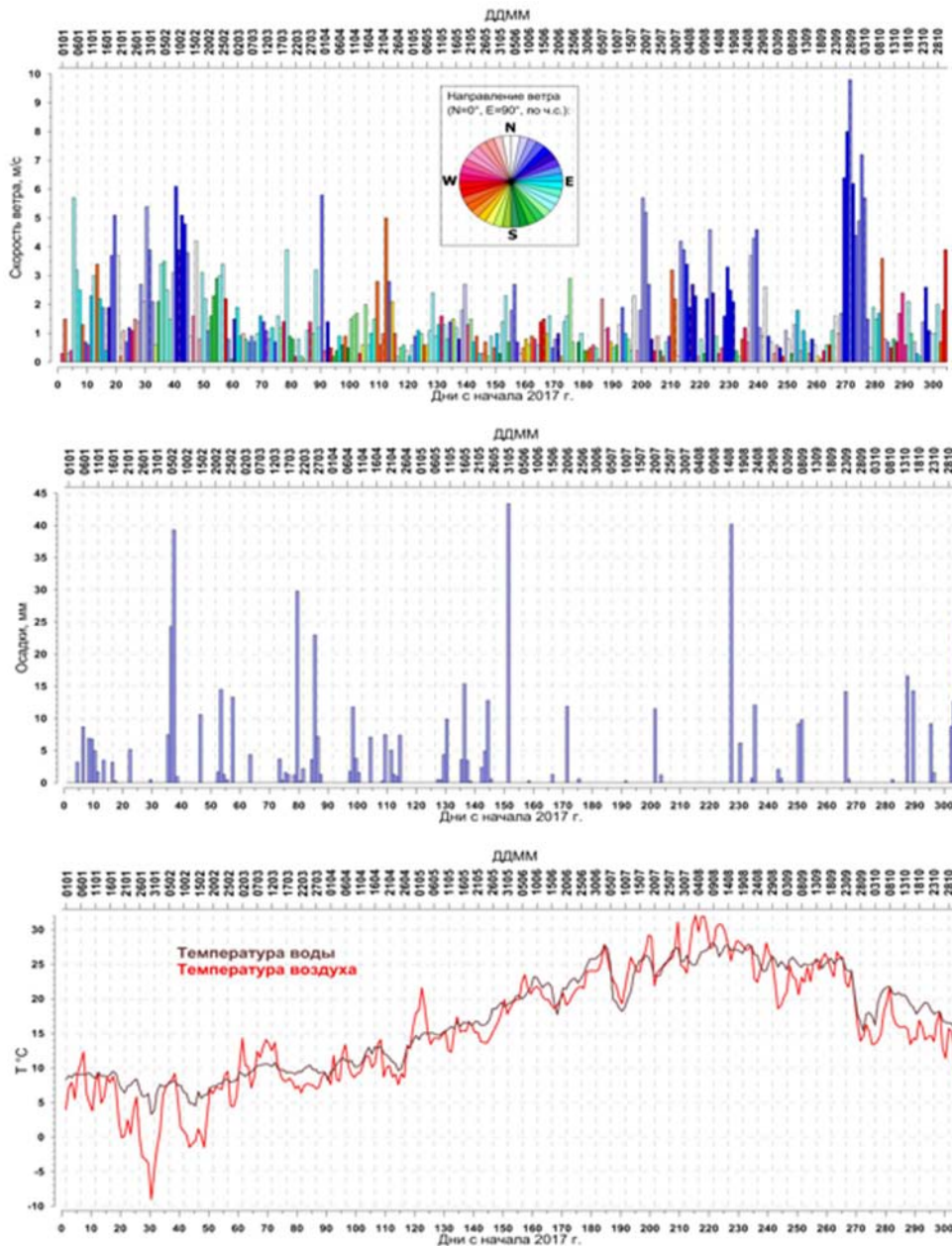


РИС. 2.2.

Годовой ход температуры (а), солёности (б), условной плотности (в), флуоресценции (г) и мутности (д) на срединной точке мониторингового 9-мильного разреза (станция над изобатой 500 м)



**РИС. 2.3.**

Среднесуточное направление и скорость ветра (верхний график), суточные осадки (средний график) и температура воздуха и поверхностной воды (нижний график) по данным метеостанции г. Геленджика в период с января по октябрь 2017 г.



плотность ( $\sigma_t < 10.6$ ) в верхнем слое наблюдалась в периоды максимального прогрева воды, с начала июля по середину сентября, когда температура ВКС была выше 25 °С. Абсолютный минимум условной плотности ( $\sigma_t < 9.3$ ) был отмечен 3 июля в верхних двух метрах и был вызван мощным дневным прогревом и слабым перемешиванием.

Положение сероводородной границы (изопикна 16.15) немного понизилось по сравнению с предыдущим годом (162 м в среднем по сравнению со 158 м в 2016 г.). Соответственно увеличилась и толщина кислородсодержащего слоя (от поверхности до изопикны 15.85): со 134 м в среднем в 2016 г. до 140 м в среднем в 2017 г. Связано это с более сильным зимним перемешиванием, уменьшающим температуру в ХПС и повышающим его плотность.

Данные по флюоресценции Chl-a в 2017 г. показали следующую динамику. Всего за год наблюдалось несколько вспышек цветения фитопланктона с концентрациями более 1.2 мкг/л: в середине апреля и середине мая, в середине июля, середине сентября и начале ноября (рис. 2.2г). Апрельское цветение располагалось под термоклином и над ХПС, в диапазоне 25-40 м, майское и июльское – в термоклине (12-23 м), сентябрьское – тоже в термоклине, но глубже (24-30 м), и ноябрьское – в верхней части ВКС (от поверхности до 12 м). По мере охлаждения и увеличения толщины ВКС осенью, максимум концентраций флюоресценции вместе с термоклином смещался вниз. В целом цветение было обильнее, чем в предыдущем году, что связано с наличием ярко выраженного ХПС и, как следствие, большим притоком биогенов из этого слоя в эвфотический слой. Обычно к началу октября цветение фитопланктона снижается, сохраняясь только в ВКС, но благодаря теплой осени ноябрьские концентрации Chl-a в верхнем слое были ненамного меньше весенних и летних значений, превышая 1.2 мкг/л в верхних 33 м на станции с глубиной 1000 м. На станции с глубиной 500 м из-за повышенной мутности концентрации Chl-a более 1.2 мкг/л в начале ноября были сосредоточены в верхних 12 м. Максимум концентраций Chl-a был зафиксирован 17 июля на глубине 16 м и составил 1.74 мкг/л.

2017 г. был отмечен феноменально высокой концентрацией мутности. Отмеченный первый раз 26 апреля, слой мутности с концентрациями  $> 0.8$  ntu был от поверхности до почти 80 м глубины, цепляя даже ХПС. Во время последующих рейсов слой мутности был локализован в ВКС и частично термоклине, оставаясь в пределах верхних 25 м (рис. 2.2д). Концентрации мутности были в целом несколько выше на ближних к берегу станциях, но тем не менее оставались очень большими на всем мониторинговом разрезе. Этот феномен наблюдался вплоть до конца июля, и только в августе вода начала постепенно очищаться. 5 октября локальные максимумы мутности были зафиксированы на глубине 35 и 50-60 м (соответственно нижняя часть ВКС и термоклин на тот момент), и 6 ноября слои повышенной мутности располагались в верхней части ВКС и термоклине. За все годы мониторинга мы впервые отмечаем столь высокие концентрации этого параметра. Слабый локальный береговой сток едва ли смог бы обеспечить подобные ве-

личины, не говоря уже о длительности и масштабах наблюдаемого феномена. Скорее всего, источник повышенной мутности располагался юго-восточнее (Сочинский район и южнее), откуда распространялся посредством ОЧТ. Возможным объяснением феномена может быть адвекция замутненных вод ОЧТ с более южных районов в период таяния накопившегося за период холодной зимы снежного покрова на участках высокогорья. Максимальные концентрации мутности были отмечены 6 и 19 июня: соответственно 4.5 ntu на самой дальней точке разреза с глубиной 1500 м на горизонте 3 м и 4.98 ntu на точке разреза с глубиной 50 м на горизонте 6 м.

### Годовой ход изменения гидрохимических параметров

На рисунке 2.4 представлены графики временного изменения содержания биогенных элементов в верхнем 60-метровом слое моря на станции, расположенной над изобатой 500 метров на 9-мильном разрезе (вверху даты выходов в море).

Анализ графиков годового хода гидрохимических параметров по данным судового мониторинга показывает, что в теплый период 2017 года минимальное содержание биогенных элементов в деятельном слое моря приходится на первую половину осени. Сильные и продолжительные норд-осты, имевшие место в конце сентября – начале октября, углубили ВКС за счет турбулентного вовлечения до 50 м как по температуре, так и по химическим показателям.

Таким образом, интенсивное ветровое перемешивание, связанное с длительным норд-остом, способствовало формированию в вертикальной гидрохимической структуре обширного слоя вод, обедненного биогенными элементами. По-видимому, это было связано с увеличением интенсивности фотосинтетической деятельности фитопланктона (содержание Chl-a увеличилось в 2 раза после шторма в верхнем 20-метровом слое), что является достаточно типичной его реакцией на штормовое воздействие. Что касается уменьшения абсолютного и процентного содержания кислорода в деятельном слое в этот период (рис. 2.5), оно отчасти связано с повышением температуры столба воды за счет вертикального перемешивания и проникновения теплой воды сверху вниз.

В целом естественный ход сезонной изменчивости биогенных элементов заключается в уменьшении концентраций форм азота, фосфора и кремния с началом вегетативного периода фитопланктона и их накопление в воде в зимнее время года. Средние значения для деятельного слоя по сезонам и за весь год представлены на рисунке 2.6.

В целом следует отметить, что увеличение или уменьшение фонового содержания биогенных элементов в различные годы в деятельном слое моря связано с множеством различных факторов.

В таблице 2.1 представлены средние за год значения химических параметров, рассчитанные для верхнего 50-метрового слоя воды по данным, полученным на мониторинговом разрезе за экспедиционный период 2014 - 2017 гг.

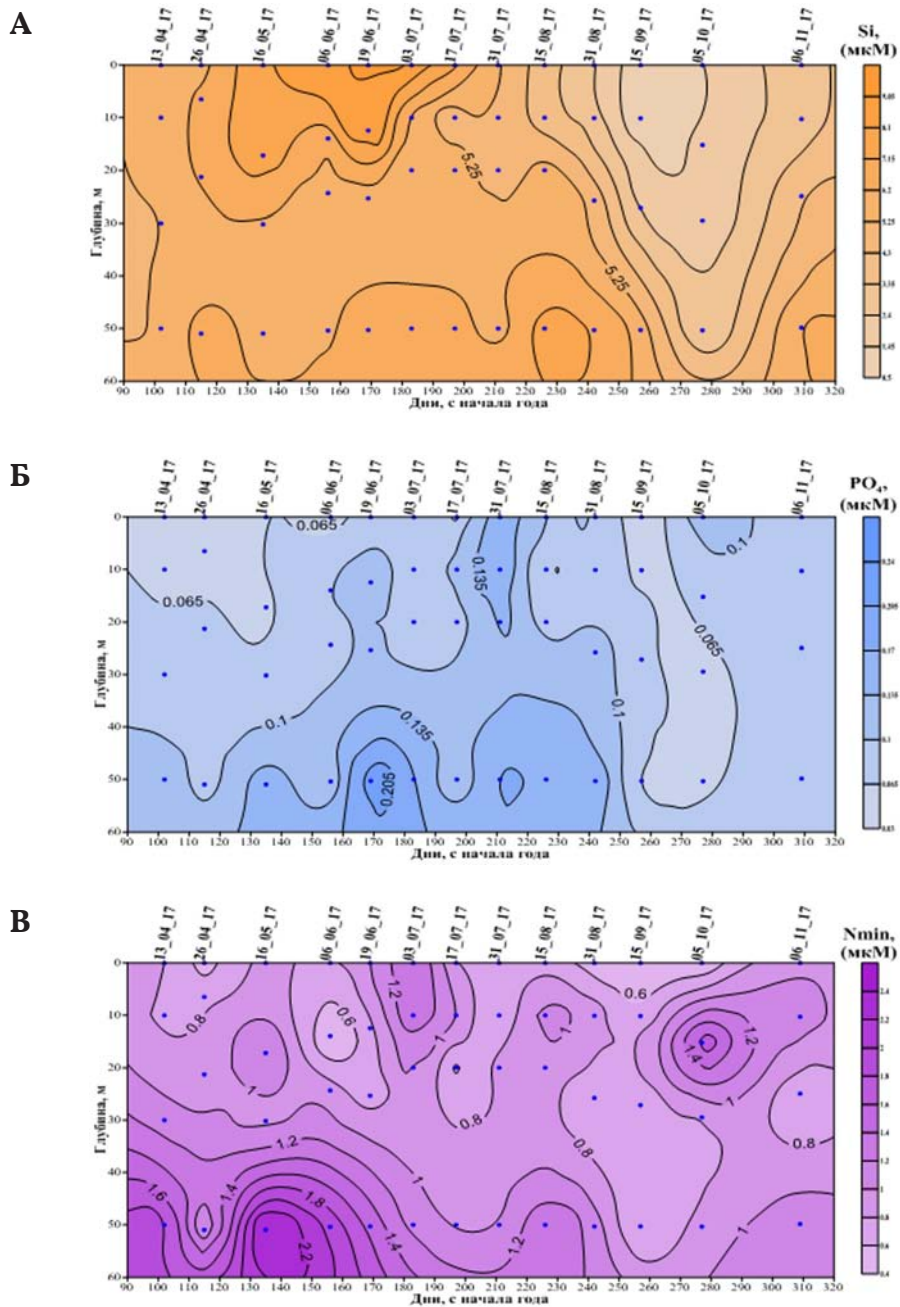


РИС. 2.4.

Годовой ход содержания кремния (а), фосфатов (б) и минерального азота ( $N_{\min} = NO_3 + NO_2 + NH_4$ ) (в) на станции 500 м в 2017 г.

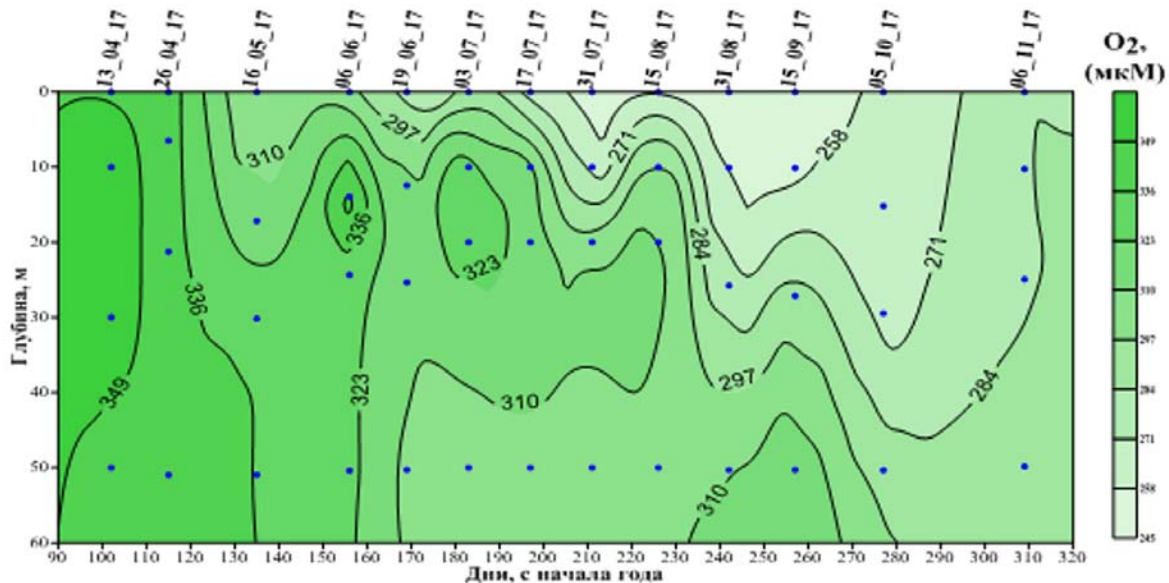


РИС. 2.5.

Годовой ход содержания растворенного кислорода на станции 500 м в 2017 г.

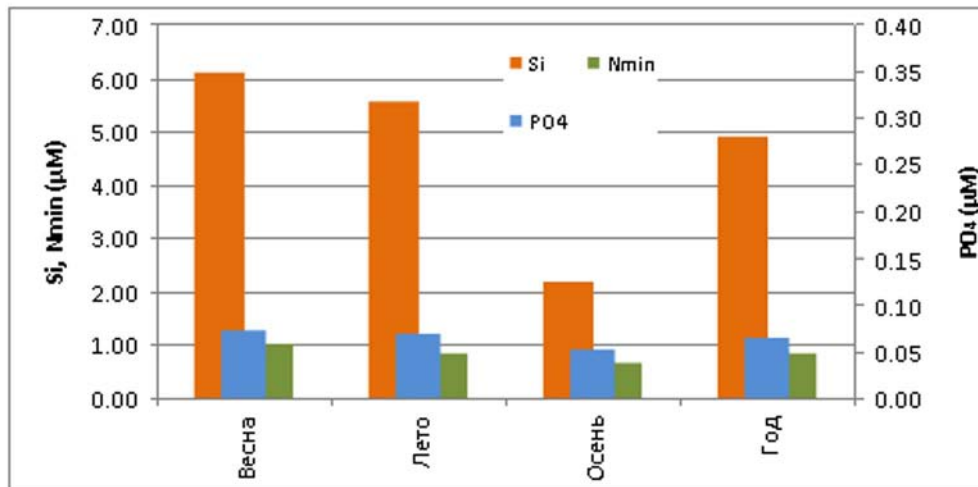


РИС. 2.6.

Сезонная изменчивость концентраций основных биогенных элементов в 2017 г.

**Таблица 2.1. Среднегодовые значения концентрации биогенных элементов в верхнем 50-метровом слое воды на мониторинговом разрезе в 2014-2017 гг.**

| Параметр                                 | Среднее значение за год |         |         |         |
|--|-------------------------|---------|---------|---------|
|  | 2014 г.                 | 2015 г. | 2016 г. | 2017 г. |
| Растворенный кислород ( $O_2$ ), $\mu M$ | 275.9                   | 331.4   | 276.4   | 294.7   |
| Фосфаты ( $PO_4$ ), $\mu M$              | 0.06                    | 0.05    | 0.07    | 0.07    |
| Фосфор общий, $\mu M$                    | 0.33                    | 0.25    | 0.26    | 0.32    |
| Кремний (Si), $\mu M$                    | 2.20                    | 1.97    | 3.18    | 4.90    |
| Нитраты ( $NO_3$ ), $\mu M$              | 0.77                    | 0.68    | 0.60    | 0.36    |
| Нитриты ( $NO_2$ ), $\mu M$              | 0.06                    | 0.05    | 0.09    | 0.07    |
| Аммоний ( $NH_4$ ), $\mu M$              | 0.65                    | 0.67    | 1.06    | 0.46    |
| Азот минеральный ( $N_{мин}$ ), $\mu M$  | 1.47                    | 1.45    | 1.82    | 0.85    |

Полученные результаты показывают, что в деятельном слое моря в 2017 г. наблюдалась тенденция уменьшения запаса минерального азота в 1.7 раза по сравнению с прошлыми годами. Это касается как в целом  $N_{мин}$ , так и его всех отдельных форм ( $NO_3$ ,  $NO_2$ ,  $NH_4$ ). Наиболее ярко выраженное уменьшение концентраций относится к среднегодовым величинам аммония (в 2.3 раза) и нитратов (в 1.7 раза).

Следует отметить тренд повышения среднегодового содержания кремния, отмечаемого нами второй год подряд (с 2016 г.), который сменил тенденцию уменьшения концентраций кремниевой кислоты в прибрежно-шельфовой зоне моря в течение трех лет (с 2013 по 2015 г.). В отличие от 2015 года, кремний перестал выступать в роли фактора, лимитирующего процессы развития биологических сообществ. Содержание фосфора в минеральном и органическом виде осталось без значимых изменений относительно исследований предыдущих лет.

Изменчивость содержания биогенных элементов в различные годы в деятельном слое моря связано с межгодовой изменчивостью гидрологической структуры, динамики вод и функционированием морских биологических сообществ. Влияние этих факторов на формирование запаса биогенных элементов в конкретный год/сезон может происходить как в одном, так и в противоположных направлениях. Поэтому выявление вкладов каждого из них на гидрохимический режим требует наличия комплексных



(гидрохимия, гидрология, гидрофизика, биология) данных, и их совместного тщательного анализа.

Распределения Chl-a, измеренного «*in situ*» на разрезе в 2017 г.

Распределение Chl-a является одной из важных характеристик функционирования экосистемы. Его количество, в значительной степени, определяет величину первичной продукции органического вещества в море и, следовательно, трофический статус района. Характер вертикального распределения Chl-a является показателем обеспеченности пищей фитофагов, обитающих на разных глубинах, и формирует особенности и пути трансформации и переноса энергии по пищевой цепи.

Распределение средней концентрации Chl-a в эвфотическом слое моря на разных станциях разреза в разные периоды наблюдений 2017 г. показано на рисунке 2.7. В апреле наблюдались самые высокие значения концентрации автотрофного фитопланктона на всех станциях разреза. Максимальные концентрации Chl-a были в прибрежной зоне, по мере удаления от берега концентрация фитопланктона снижалась. Такая же тенденция уменьшения концентрации Chl-a от берега в открытое море сохранялась до середины лета и, по-видимому, была связана с поступлением минеральных веществ с береговым стоком. В этот период значения средней концентрации в прибрежном районе были в 2 раза выше, чем в глубоководной части разреза. Во второй половине года значения средних концентраций Chl-a мало различались на разрезе от берега в открытое море, указывая на сходные условия минерального питания во всем районе исследования.

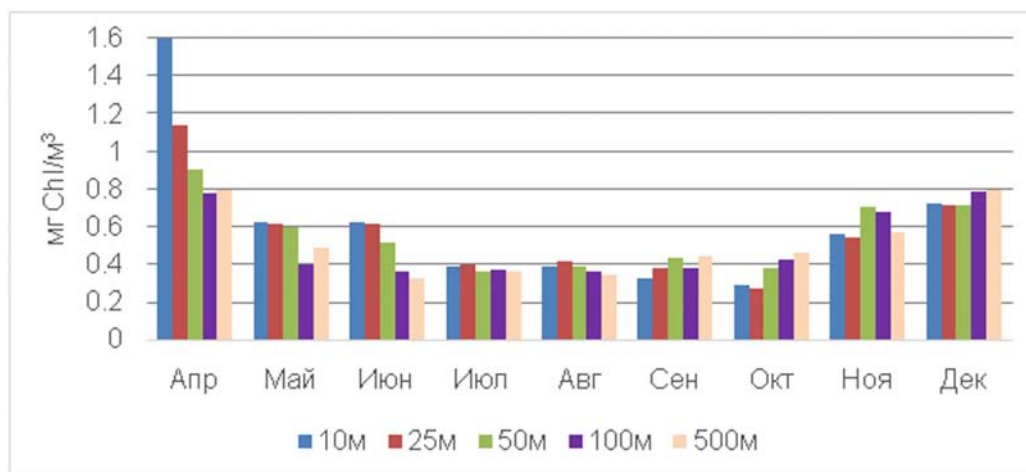


РИС. 2.7.

Сезонные изменения средней концентрации Chl-a в эвфотическом слое на разных станциях мониторингового разреза в 2017 г.

Таким образом, влияние берегового стока проявлялось главным образом в прибрежной зоне моря и имело убывающее влияние от весны к осени: от паводкового периода к относительно засушливому периоду середины и конца лета, что естественно.

Следует отметить высокое содержание Chl-a в апреле 2017 г. по сравнению с предыдущими 2015 и 2016 гг. (0.8-1.6 мг/м<sup>3</sup> и 0.4-0.6 мг/м<sup>3</sup> соответственно). Можно предположить, что это явление связано с холодной зимой 2016-2017 гг., и как следствие, более глубокой конвекцией, поднявшей глубинные воды, богатые биогенными элементами. Сезонная динамика Chl-a в 2017 г. характеризовалась ярко выраженным весенним максимумом, летним минимумом и последующим осенне-зимним увеличением его концентрации (см. рис. 2.7).

Характер вертикального распределения Chl-a значительно изменялся в течение года (рис. 2.8). В значительной степени эти изменения были связаны с особенностями гидрофизического режима: температурной стратификацией, глубиной залегания сезонного термоклина, горизонтальным сдвигом скорости ОЧТ. В апреле до установления температурной стратификации моря высокие значения Chl-a (выше 0.6 мг/м<sup>3</sup>) наблюдались во всем столбе воды. Максимальные значения (1.1-1.4 мг/м<sup>3</sup>) регистрировались в верхнем 20-метровом слое вдоль всего разреза (рис. 2.8а). В мае-июне по мере формирования температурного градиента концентрация Chl-a в верхнем 10-метровом слое снижается, а ее максимальные значения (0.8-1.0 мг/м<sup>3</sup>) совпадают по глубине со слоем температурного скачка (рис. 2.8б, в). Ниже 50 м содержание Chl-a не превышает 0.2 мг/м<sup>3</sup>. Необычная для летнего периода картина вертикального распределения Chl-a наблюдалась в начале июля (рис. 2.8г). Узкий ярко выраженный максимум концентрации (1.5-3.0 мг/м<sup>3</sup>) был образован на глубине 10 м, при этом во всем слое воды глубже 25 м концентрация не превышала 0.2 мг/м<sup>3</sup>. В середине сентября концентрация Chl-a в верхнем квазиоднородном слое (0-20 м) снизилась до 0.2-0.4 мг/м<sup>3</sup> (рис. 2.8д). Максимальные значения составляли 0.6 мг/м<sup>3</sup> и были приурочены к слою температурного скачка. В начале октября после сильного и продолжительного ветра северо-восточных румбов толщина ВКС увеличилась до 50 м, и максимальные значения Chl-a наблюдались над слоем скачка (рис. 2.8е).

Рисунок 2.9 иллюстрирует изменения характера вертикального распределения температуры и концентрации Chl-a до и после сильного шторма в конце сентября. Толщина верхнего квазиоднородного слоя после шторма увеличилась от 20 до 50 м, а профиль концентрации Chl-a с хорошо выраженным максимумом на глубине 25 м в слое температурного скачка (рис. 2.9б) сменился более равномерным распределением Chl-a в верхнем 50-метровом слое (рис. 2.9г). Сильный шторм вызвал двукратное увеличение количества Chl-a в верхнем 20-метровом слое на внешнем шельфе и склоне:  $0.19 \pm 0.01$  мг/м<sup>3</sup> и  $0.37 \pm 0.2$  мг/м<sup>3</sup> до и после шторма соответственно.

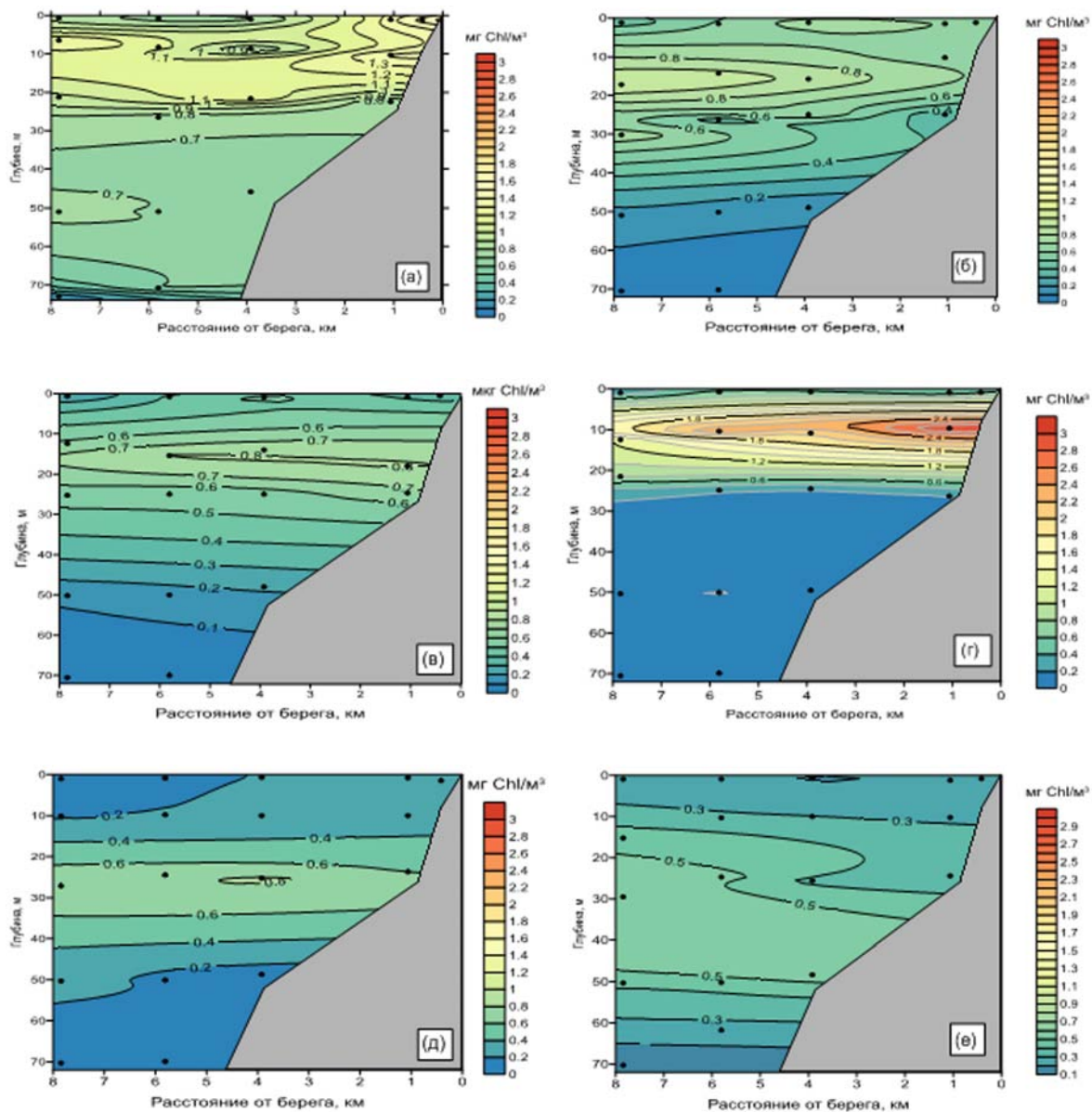
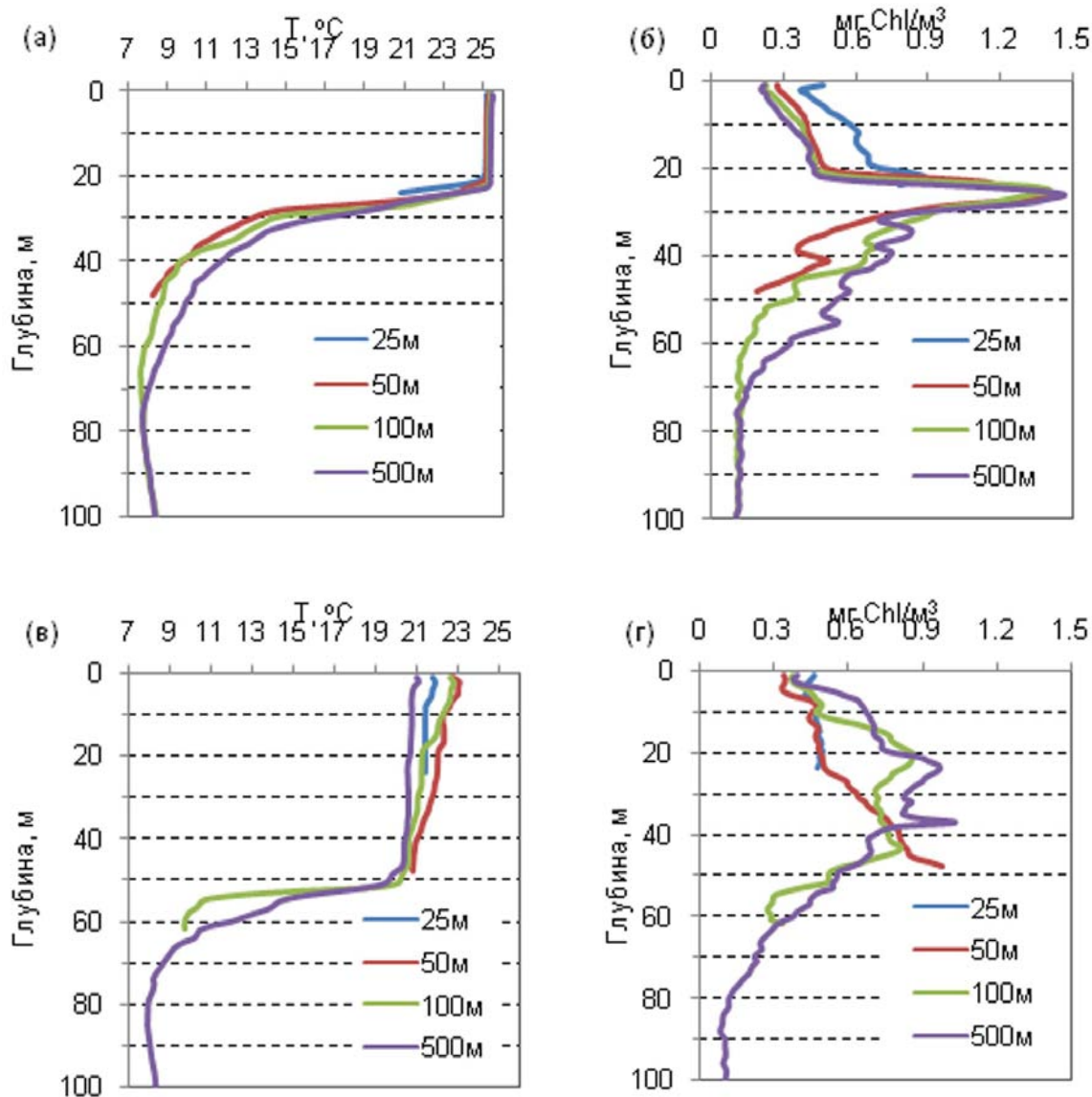


РИС. 2.8.

Вертикальное распределение Chl-а по мониторинговому разрезу в 2017 г.  
 а - 15 апреля, б - 16 мая, в - 19 июня, г - 03 июля, д - 15 сентября, е - 05 октября

**РИС. 2.9.**

Вертикальные профили температуры (а, в) и концентрации Chl-а (б, г) до шторма (15 сентября 2017, верхняя панель) и после шторма (05 октября 2017, нижняя панель) на станциях мониторингового разреза с глубиной 25, 50, 100 и 500 м

### Динамика численности и биомассы мезозoopланктона

Годовая динамика численности, биомассы и таксономического состава мезозoopланктона на шельфе в 2017 г. представлена на рисунке 2.10. Максимум численности был отмечен в апреле за счет массового развития гетеротрофной динофлагелляты *Noctiluca scintillans*, численность которой достигала 6000 клеток/м<sup>3</sup> (рис. 2.10а). Второй пик численности наблюдался в июле и был обусловлен развитием кладоцер, составлявших около 50% от общей численности зоопланктона. В остальное время года общая численность мезозoopланктона менялась незначительно, составляя 2-3 тыс экз/м<sup>3</sup>.

Биомасса зоопланктона (В), выраженная в единицах углерода, характеризовалась резким падением значений во второй половине года (рис. 2.10б).

Если в апреле-июле она составляла 12-15 мг С/м<sup>3</sup>, то в августе-декабре ее значения не превышали 6 мг С/м<sup>3</sup>. Возможно, причиной такого падения послужила высокая летняя температура и уменьшение количества растительной пищи в верхнем перемешанном слое.

В течение всего исследованного периода копеподы составляли более половины всей биомассы зоопланктона, а в осенний сезон их роль возрастала до 80% от общей биомассы (рис. 2.10в). Хетогнаты присутствовали в планктоне в значительном количестве в течение всего года, образуя в среднем около 20% биомассы. В июле-сентябре происходило массовое развитие кладоцер. В этот период их вклад в общую биомассу составил 25-35%. Доля ноктилюки в общей биомассе была ниже 15%, несмотря на ее многочисленность, что связано с высоким процентным содержанием воды в теле этого организма.

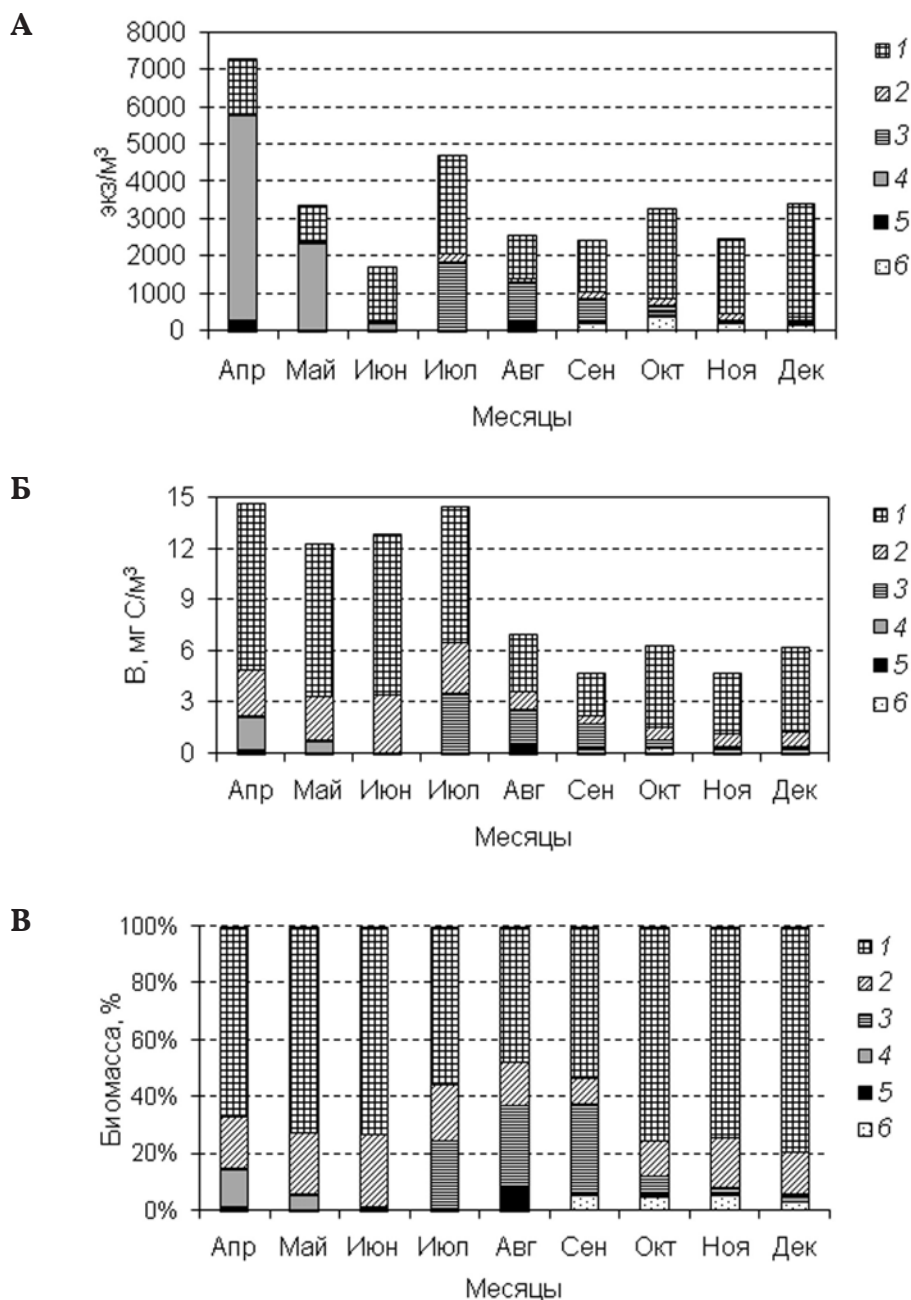
Средние для года значения биомассы мезозoopланктона составили  $9.2 \pm 4.3$  мг С/м<sup>3</sup>, что достоверно не отличается от значений, зарегистрированных в 2015-2016 гг.

### Распределение желетелого макрозоопланктона

Желетелый макропланктон представлен медузой *Aurelia aurita* и гребневиками-вселенцами *Mnemiopsis leidyi* и *Beroe ovata*. *A. aurita* – автохтонный черноморский вид, оба гребневика вселились в Черное море в конце прошлого столетия. Все три вида являются хищниками высшего порядка (*A. aurita* и *M. leidyi* питаются зоопланктоном, а *B. ovata* является облигатным хищником, потребляющим лобатных гребневиков) и играют ведущую роль в формировании структуры сообщества и функционировании трофической сети черноморской пелагиали (Kideys, 2002).

Годовая динамика обилия желетелого макрозоопланктона в 2017 г. представлена на рис. 2.11. В 2017 г. сохранилась наблюдающаяся в последние пять лет тенденция к увеличению численности и биомассы медузы *A. aurita*. В течение всего года, за исключением середины лета, медузы доминировали по численности, составляя в среднем за год (среднее  $\pm$  SE)  $13 \pm 2$  экз/м<sup>2</sup> с максимальными значениями 20-21 экз/м<sup>2</sup> (рис. 2.11а). Среднегодовая численность *M. leidyi* равнялась  $5 \pm 2$  экз/м<sup>2</sup>, максимальные значения

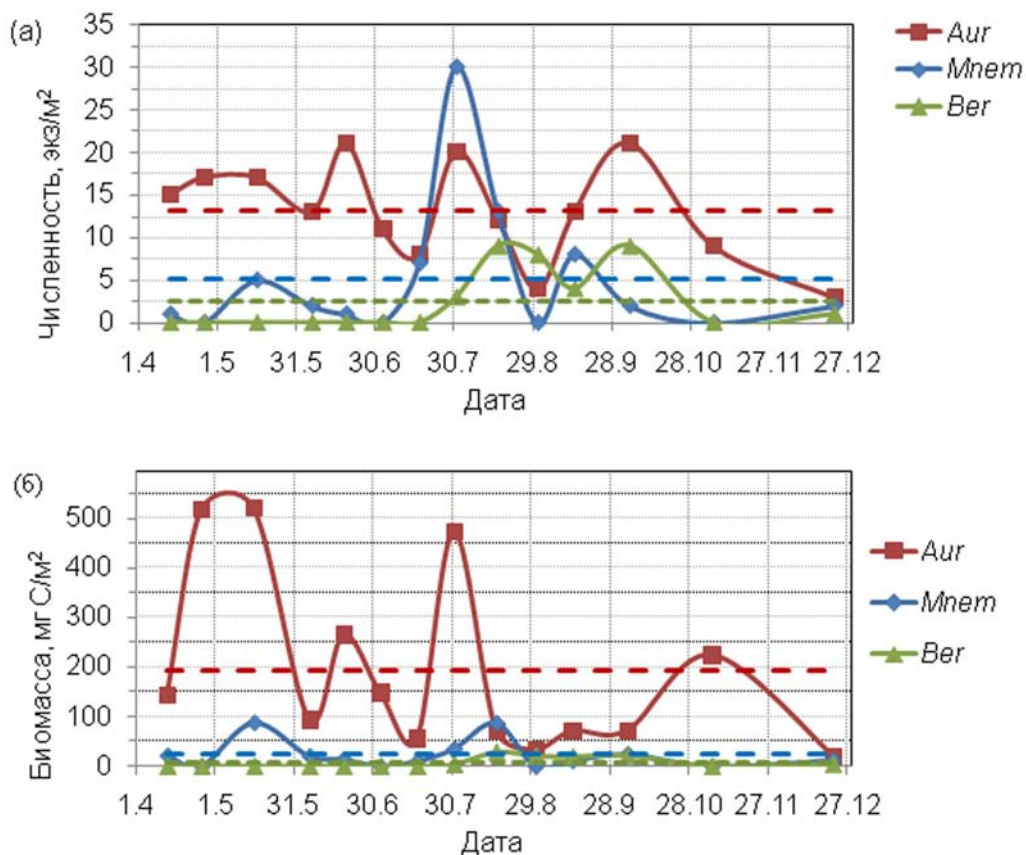


**РИС. 2.10.**

Годовая динамика численности (а), биомассы (б) и таксономической структуры (в) мезозoopланктона в шельфовой области северо-восточной части Черного моря в 2017 г. 1 – *Copepoda*, 2 – *Chaetognatha*, 3 – *Cladocera*, 4 – *Noctiluca*, 5 – larvae, 6 – varia

(30 экз/м<sup>2</sup>) наблюдались в конце июля в период массового развития вида. Гребневик *B. ovata* появился в моретольков середине лета; его численность в августе-октябре достигала 9 экз/м<sup>2</sup>.

Среднегодовое значение биомассы медуз в единицах углерода (среднее ± SE) составило 193 ± 48 мг С/м<sup>2</sup> (рис. 2.11б). Для гребневиков *M. leidyi* и *B. ovata* этот показатель равнялся 23 ± 8 мг С/м<sup>2</sup> и 7 ± 3 мг С/м<sup>2</sup> соответственно. В 2017 г. доля медуз достигла 87% общей среднегодовой биомассы желетелого макропланктона. Соответственно, доля гребневика вселенца *M. leidyi* сократилась до 10% общей среднегодовой биомассы желетелого макропланктона. Для сравнения, в 2005–2009 гг. медузы составляли около 60% биомассы (Арашкевич и др., 2015).



**РИС. 2.11.**

Сезонная динамика численности (а) и биомассы (б) желетелого макрозоопланктона в прибрежном районе северо-восточной части Черного моря в 2017 г. (*Aur* – медуза *Aurelia aurita*; *Mnem* – гребневик *Mnemiopsis leidyi*; *Ber* – гребневик *Beroe ovata*)

Пространственные изменения численности и биомассы желетелого макрозоопланктона по разрезу от мелководья до континентального склона (глубины 10, 25, 50 и 500 м) в разные сезоны представлены на рисунке 2.12. Наибольшая численность и биомасса медузы *A. aurita* во все сезоны была отмечена на удаленных от берега станциях; в 2017 г. на мелководье медуза не была встречена. Численность и биомасса *M. leidy* мало изменялась по разрезу, за исключением летнего сезона, когда максимальное обилие этого вида было отмечено на внутреннем шельфе.

Гребневик *B. ovata* появился в исследуемом районе только в конце июля, когда вода максимально прогрелась, а плотность популяции его кормового объекта – *M. leidy* – достигла высокой численности. Распределение этого вида было ограничено главным образом срединным шельфом и областью склона. К зиме, с уменьшением количества пищи и понижением температуры воды берое практически исчез в акватории.

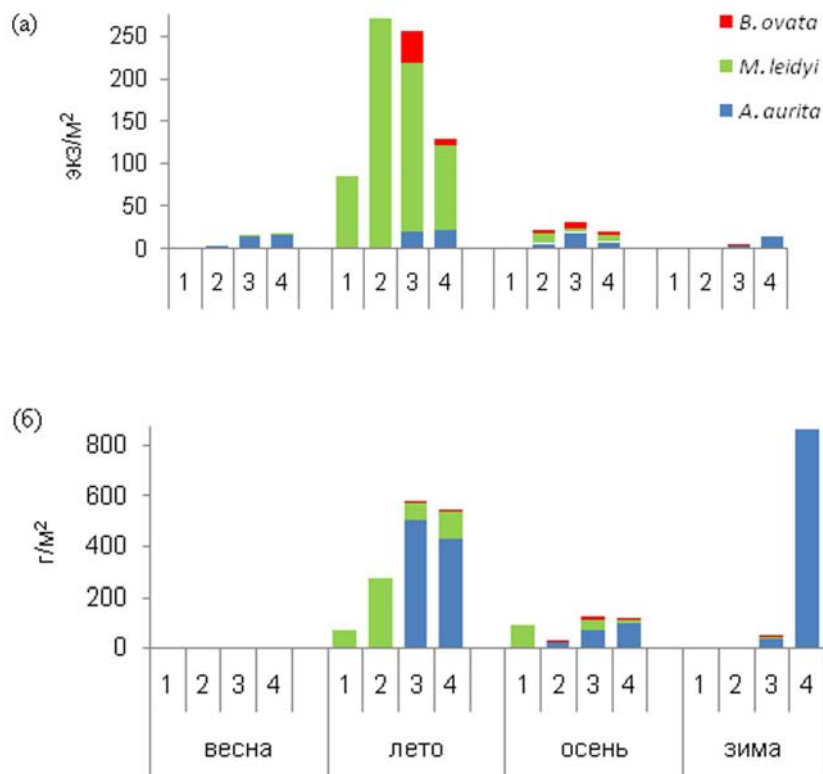


РИС. 2.12.

Численность (а) и биомасса (б) медузы *Aurelia aurita* и гребневиков *Mnemiopsis leidy* и *Beroe ovate* на мониторинговом разрезе в 2017 г.

1 – мелководье, 2 – внутренний шельф, 3 – срединный шельф, 4 – континентальный склон

Сезонные изменения размерной структуры желетелого макрозоопланктона показаны на рисунке 2.13. У всех трех видов молодь в зимний период не встречалась, очевидно, в связи с похолоданием воды и прекращением размножения осенью. Однако, если у *M. leidy* и *A. aurita*, питающихся кормовым зоопланктоном, после массового размножения летом наблюдалось увеличение доли крупных экземпляров, то в популяции *B. ovata* крупные особи так и не появились. По-видимому, это связано с тем, что в 2017 г. размножение мнемииописа началось на две недели позднее обычного, только во второй половине июля, и к августу популяция не достигла максимальной численности. Вследствие этого популяция *B. ovata*, вначале успешно размножившаяся, осенью оказалась не обеспеченной достаточным количеством пищи, запасы которой были подорваны в конце лета. Молодь медузы *A. aurita* встречалась в планктоне в течение почти всего периода исследований, кроме конца декабря. Наблюдалось два максимума молодых особей в популяции – весной и во второй половине лета. Размножение медуз, толерантных к температуре среды, начиналось в самом начале гидрологической весны, затем к лету наиболее крупные старые экземпляры отмирали, а подросшая весенняя генерация участвовала в размножении во второй половине лета.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 2

1. Арашкевич Е.Г., Луппова Н.Е., Никишина А.Б., др. Судовой экологический мониторинг в шельфовой зоне Черного моря: оценка современного состояния пелагической экосистемы // Океанология. 2015. Т. 55. № 6. С. 964-964.
2. Подымов О.И., Зацепин А.Г. Сезонные изменения солености воды в Геленджикском районе Черного моря по данным судового мониторинга // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 370-383.
3. Anninsky B.E. Organic composition and ecological energetics of jellyfish *Aurelia aurita* L. (Cnidaria, Scyphozoa) under the Black Sea conditions // Trophic relationships and food supply of heterotrophic animals in the pelagic ecosystem of the Black Sea / Eds. Shulman G.E. et al. Istanbul: Black Sea Commission Publications, 2009. P. 99-160.
4. Arashkevich E.G., Stefanova K., Bandelj V. et al. Mesozooplankton in the open Black Sea: regional and seasonal characteristics // Journal of Marine Systems. 2014. V. 135. P. 81-96.
5. Finenko G.A., Romanova Z.A., Abolmasova G.I. et al. Population dynamics, ingestion, growth, and reproduction rates of the invader *Beroe ovata* and its impact on plankton community in Sevastopol Bay, the Black Sea // J. Plankton Res. 2003. V. 25 (5). P. 539-549.
6. Kideys A.E. Fall and rise of the Black Sea ecosystem // Science. 2002. V. 297. № 5586. P. 1482-1484.
7. Strickland J.D.H., Parsons T.R. A practical handbook of seawater analysis. Pigment analysis // Bull. Fish. Res. Bd. Can. 1968. V. 167. P. 1-311.

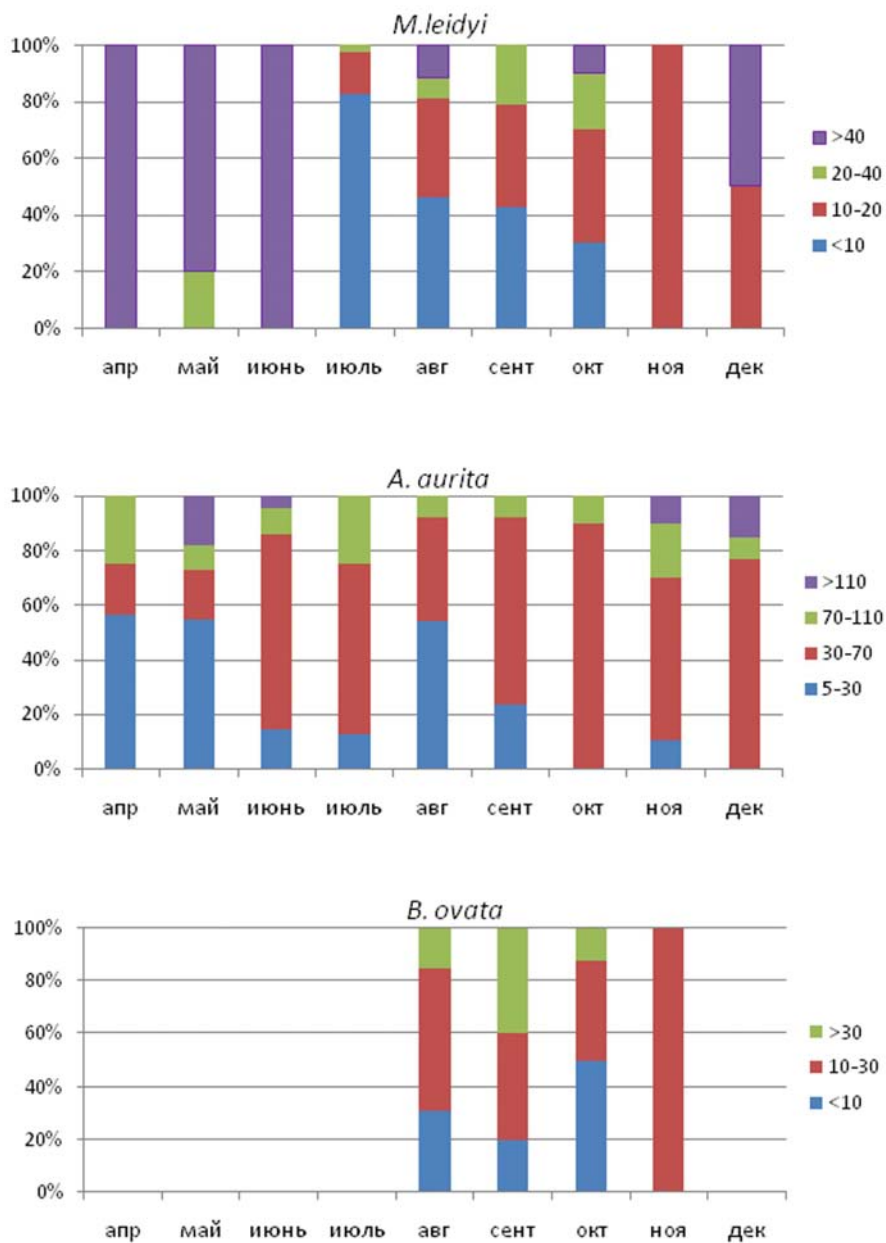


РИС. 2.13.

Сезонная динамика размерной структуры трех видов желетелого макропланктона. Размеры даны в мм