

УДК 551.464:551.35(262.54)

ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННОГО И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИТОПИГМЕНТОВ В ДОННЫХ ОСАДКАХ АЗОВСКОГО МОРЯ ПРИ РАЗНЫХ КИСЛОРОДНЫХ РЕЖИМАХ

Косенко Ю.В., Шевцова Е.А., Баскакова Т.Е.

ФГБНУ «Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства», Ростов-на-Дону,

e-mail: kosenko_y_v@azniirkh.ru

В работе проведено исследование пространственно-временного распределения фитопигментов (хлорофилла «а» и каротиноидов) в донных отложениях Азовского моря в условиях разного кислородного режима. Были отобраны пробы грунтов по стандартной сетке станций, охватывающей всю территорию собственно моря и Таганрогского залива. Для сравнения проведен сезонный анализ содержания фитопигментов в донных отложениях в 2013 г. в условиях обширных заморных зон и 2014 г. при отсутствии заморных явлений в придонном горизонте. Проведена корреляционная взаимосвязь источников поступления и потребления каротиноидов в донных отложениях Азовского моря. Значительная пространственно-временная изменчивость содержания фитопигментов в донных отложениях Азовского моря является отражением взаимодействия новообразования и трансформации органического вещества в воде и донных осадках. Показано, что пелитовые илы в донных осадках Азовского моря являются источником органического вещества, потребляемого бентосными организмами и бактериобентосом. Особенностью весеннего периода является высокое содержание хлорофилла «а», каротиноидов и органического углерода в донных отложениях в центральном и юго-восточном районах собственно моря, в связи с активными процессами осадконакопления в зимнее время года. В условиях дефицита кислорода летом происходит снижение фитопигментов в донных осадках относительно весеннего периода года, что обусловлено активизацией сульфатредуцирующих бактерий. В осенний период года после формирования летнего замора в придонном горизонте в собственно море отмечена выраженная седimentация и первичная деструкция отмершего в летний период органического вещества. Пространственное осадконакопление в собственно море и Таганрогском заливе обусловлено гидрологическими и гидрометеорологическими факторами.

Ключевые слова: Азовское море, донные отложения, фитопигменты, растворенный кислород

CHARACTERISTICS OF SEASONAL AND SPATIAL DISTRIBUTION OF PHYTOPIGMENTS IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE AZOV SEA UNDER DIFFERENT OXYGEN REGIMES

Kosenko Yu.V., Shevtsova E.A., Baskakova T.E.

*Federal State Budgetary Scientific Institution «Azov Research Institute of Fisheries», Rostov-on-Don,
e-mail: kosenko_y_v@azniirkh.ru*

The spatiotemporal distribution of phytopigments (chlorophyll «a» and carotenoids) was studied in the bottom sediments of the Azov Sea under conditions of different oxygen regimes. Bottom sediments were sampled applying standard grid mapping covering the entire area of the sea and the Taganrog Bay. We compared seasonally analyzed photopigment content of the bottom sediments observed in 2013 under the conditions of extensive hypoxic zones and in 2014 when suffocation phenomena had been absent in the near-bottom layer. Correlation between the sources of carotenoids entry and consumption in the bottom sediments of the Azov Sea was revealed. Significant spatiotemporal variability of phytopigment content in the bottom sediments of the Azov sea is a reflection of the interaction of neoplasms and transformation of organic matter in water and bottom sediments. It is shown that pelitic silt in the bottom sediments of the Sea of Azov is the source of organic matter consumed by benthic organisms and bacteriobenthos. The peculiarity of the spring period was a high content of chlorophyll «a», carotenoids and organic carbon in the bottom sediments of the central and southeastern regions of the sea proper due to active sedimentation processes in the winter. In conditions of summer oxygen deficiency, phytopigments decreased in the bottom sediments relative to the spring period of the year, which had been caused by activation of sulfate-reducing bacteria. In the autumn when summer hypoxia had already formed in the near-bottom horizon in the sea proper, pronounced sedimentation and primary destruction of dead organic matter was observed. Spatial sedimentation in the sea proper and the Taganrog Bay has been caused by hydrological and hydrometeorological factors.

Keywords: Azov Sea, bottom sediments, phytopigments, dissolved oxygen

Органическое вещество в грунтах играет ведущую роль в круговороте химических элементов. Фотосинтетические пигменты в донных отложениях являются маркерами органического вещества, синтезированного фитопланктоном, фитобентосом, высшей водной растительностью, пурпурными и зелеными бактериями. Их содержание в воде характеризует продуктивность водо-

емов. Осаждение и захоронение пигментов в осадках определяется совокупным действием биологических, физических и химических факторов в водоеме и на водосборе [1]. В донных отложениях органическое вещество контролирует состав газов и их режим на границе раздела «вода – донные отложения». В южных морях, в частности Азовском море, химическая и бактериаль-

ная деградация органического вещества интенсивно происходит как в водной толще, так и на границе раздела «вода – донные отложения» [2].

В работе З.В. Александровой с соавт. [3] четко показана взаимосвязь содержания в донных отложениях Азовского моря легкоокисляемого органического вещества с развитием заморных явлений в придонном горизонте в летний период года. При этом недостаточно изучена сезонная трансформация фитопигментов в донных отложениях при разных кислородных режимах в Азовском море.

В связи с вышесказанным целью работы явилось изучение пространственно-временного распределения седиментированных растительных пигментов в связи с особенностями гранулометрического состава Азовского моря в условиях дефицита кислорода.

ных отложений, отобранных с верхнего слоя грунта моря (~2 см), выполнялся на лазерном дифракционном анализаторе частиц SALD-200V/201V (SHIMADZU).

Результаты исследования и их обсуждение

В донных осадках Азовского моря органическое вещество имеет фитогенную природу, и темп его накопления отражает интенсивность производственных процессов [3]. Статистический анализ фоновых данных позволил выявить элементы, обеспечивающие поступление легкоокисляемого органического вещества (каротиноидов) в донные отложения, а также потребление каротиноидов бактериобентосом (Бентос), а именно сульфатредуцирующими бактериями и бентосными организмами (рис. 1).

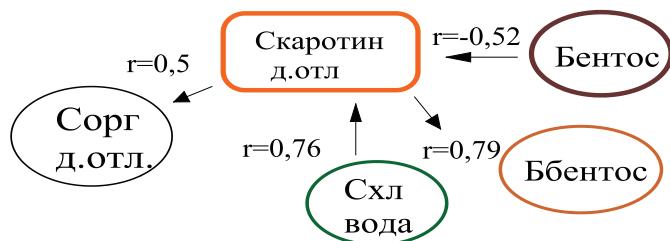


Рис. 1. Взаимосвязь компонентов образования и потребления каротиноидов в донных отложениях Азовского моря

Материалы и методы исследования

Материалом для анализа послужили пробы донных отложений, отобранные по всей акватории Азовского моря на стандартных станциях в комплексных экспедициях АЗНИИРХ в период с 2013–2014 гг. Отбор проб донных отложений для анализа пигментов осуществляли с поверхностного 2 см горизонта дночерпательем Петерсена. Растительные пигменты в донных отложениях определялись во влажных пробах экстракцией 100% ацетоном с дальнейшим спектрофотометрированием по ГОСТ 17.1.04.02-90. Определение органического углерода в донных отложениях проводили титриметрическим методом [4]. Определение сульфидной серы в донных отложениях проводили согласно РД 52.24.525-2011 «Массовая доля сульфидной серы в донных отложениях». Методика выполнения измерений фотометрическим методом с n,n-диметил-n-фенилендиамином». Анализ гранулометрического состава дон-

Бактериобентос в Азовском море получает наибольшее развитие при определенных химико-гидрологических условиях – низкая активность турбулентного перемешивания водных масс, высокая температура воды, обогащение донных осадков легкоокисляемым органическим веществом [5]. В анаэробных условиях наибольшее развитие получают сульфатредуцирующие бактерии, восстанавливающие сульфаты до сероводорода и сульфидов, причем в Азовском море сульфаты в донных отложениях присутствуют в значительных количествах (98–1274 мкг/г сырого грунта), существенно превышающих минимальную концентрацию, необходимую для сульфатредукции [6]. Интенсивный процесс сульфатредукции в осадках Азовского моря, в свою очередь, определяет образование значительного количества сульфидов железа. Кислотогенерирующие сульфиды обнаружены в концентрациях 3–1034 мкг/г сырого грунта [7]. По данным 2013 г. интенсивность сульфатредукции по акватории моря сопоставима с окислительно-восстановитель-

ными процессами в поверхностном слое донных отложений, о чем свидетельствуют низкие величины окислительно-восстановительного потенциала, переходящие в область отрицательных значений (от -25 до -135 мВ), а также показатели кислотно-щелочного равновесия (рН), соответствующие 6,14–7,93 ед.

Другим потребителем осадочного материала в Азовском море является зообентос. В связи с этим при высоких биомассах бентоса отмечено снижение содержания каротиноидов в донных отложениях, что подтверждается отрицательным коэффициентом корреляции ($r = -0,52$). Следует отметить, что в летний период в условиях гипоксии наблюдается резкое сокращение ареала обитания незамороустойчивых бентосных организмов при возрастании численности и биомассы замороустойчивых форм брюхоногих моллюсков, фораминифер, полихет [8]. Данный факт может быть объяснен высокой интенсивностью сульфатредукции и накоплением токсичного сероводорода в придонном горизонте в летний период года при дефиците кислорода. Снижение общей биомассы зообентоса в заморные годы обуславливает тот факт, что в районах с максимальной численностью сульфатредуцирующих бактерий биомасса зообентоса минимальна [6].

Общее количество органического вещества в донных осадках в целом и его биохимически подвижной части – хлорофилла и каротиноидов в частности четко отражает кислородные условия в придонном горизонте. Основной причиной заморов в лет-

ний период года в Азовском море является повышенное поступление автохтонного органического вещества, что приводит к накоплению легкоокисляемых веществ в донных отложениях и, как следствие, увеличению масштабов заморных зон в придонном горизонте моря в условиях замедленного вертикального водообмена [3].

В формировании зон дефицита кислорода важнейшая роль принадлежит типу донных осадков (рис. 2). Глинистые и глинисто-алевритовые илы, содержащие максимальное количество легкоусвояемого органического вещества, являются первостепенным фактором активизации сульфатредуцирующих процессов.

Связь содержания фитопигментов в донных осадках с типом грунта выражается в том, что на грубодисперсных крупно-алевритовых осадках отмечается, как правило, минимальное количество $C_{\text{опр}} < 1\%$, каротиноидов $< 50 \text{ мкг/г}$ и хлорофилла «а» $< 15 \text{ мкг/г}$. При этом тонкодисперсным глинистым илам свойственно максимальное содержание общего количества легкоокисляемых фракций органического вещества в донных отложениях: $C_{\text{опр}} 2,9\text{--}3,8\%$, каротиноидов $300\text{--}800 \text{ мкг/г}$, хлорофилла «а» $60\text{--}115 \text{ мкг/г}$.

Особенности пространственного и количественного распределения фитопигментов в условиях заморных и незаморных лет в Азовском море были изучены на примере 2013–2014 гг. 2013 г. характеризовался обширными заморными явлениями в придонном горизонте, в то время как в 2014 г. на момент проведения комплексных исследований заморных зон не обнаружено.

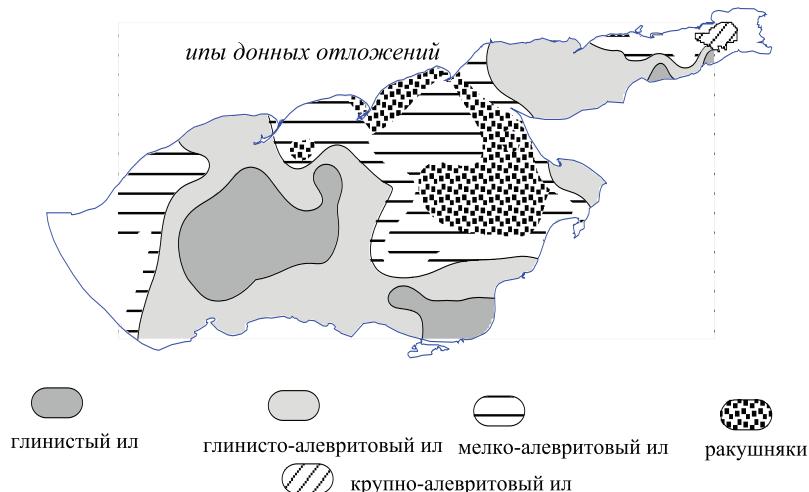


Рис. 2. Пространственное распределение типов донных осадков Азовского моря

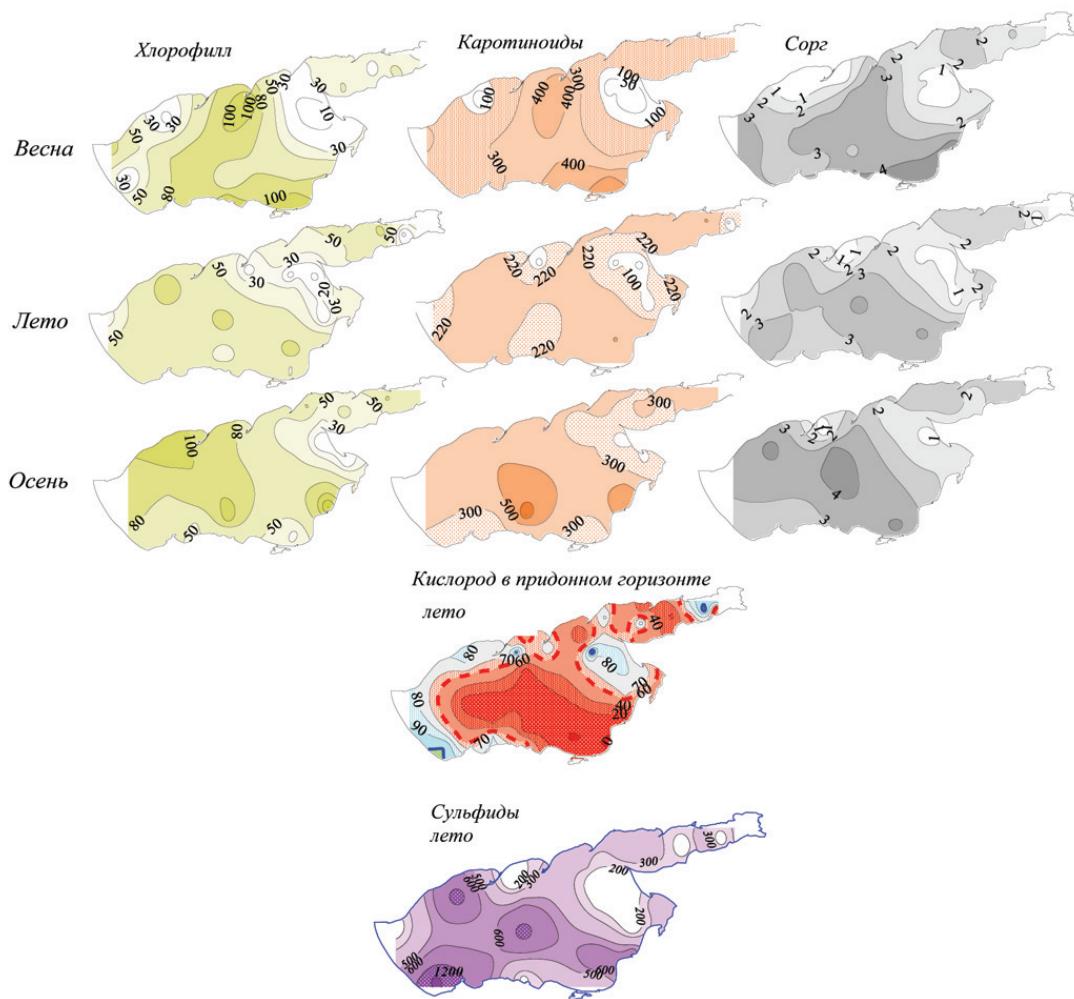


Рис. 3. Сезонная динамика хлорофилла «а» (мкг/г), каротиноидов (мкг/г) органического вещества (%) и сульфидов (мкг/г) в донных отложениях Азовского моря в 2013 г.

На рис. 3–4 на примере 2013–2014 гг. во все сезоны года отражено совпадение пространственного распределения хлорофилла «а», каротиноидов и органического углерода в донных осадках. Весной (апрель) высокое содержание хлорофилла «а», каротиноидов и органического углерода в донных отложениях обусловлено активными процессами осадконакопления в зимний период года, характерными для Азовского моря и отмеченными в центральном и юго-восточном районах собственно моря.

В летний период в условиях гипоксии (2013 г.) в центральном, южном и юго-восточном районах собственно моря отмечено достоверное ($p < 0,05$) снижение содержания в донных отложениях хлорофилла «а» на 31%, каротиноидов на 15% и органического углерода на 16% относительно весен-

него периода года (рис. 3). В летний период 2014 г. при благоприятном кислородном режиме в придонном горизонте в данных районах моря содержание фитопигментов и органического углерода в грунтах достоверно не изменялось относительно весеннего периода года (рис. 4). При сравнении уровня накопления фитогенного органического вещества в летний период 2013 и 2014 гг. отмечено наиболее выраженное снижение содержания в донных осадках хлорофилла «а» в заморных зонах, вследствие его быстрого окисления до более устойчивой формы – каротиноидов. Так, показано, что в летний период 2013 г. содержание в донных осадках хлорофилла «а» в летний период в заморных районах составляло 63 мкг/г, а в 2014 – 81 мкг/г, что выше на 29% ($p < 0,05$).

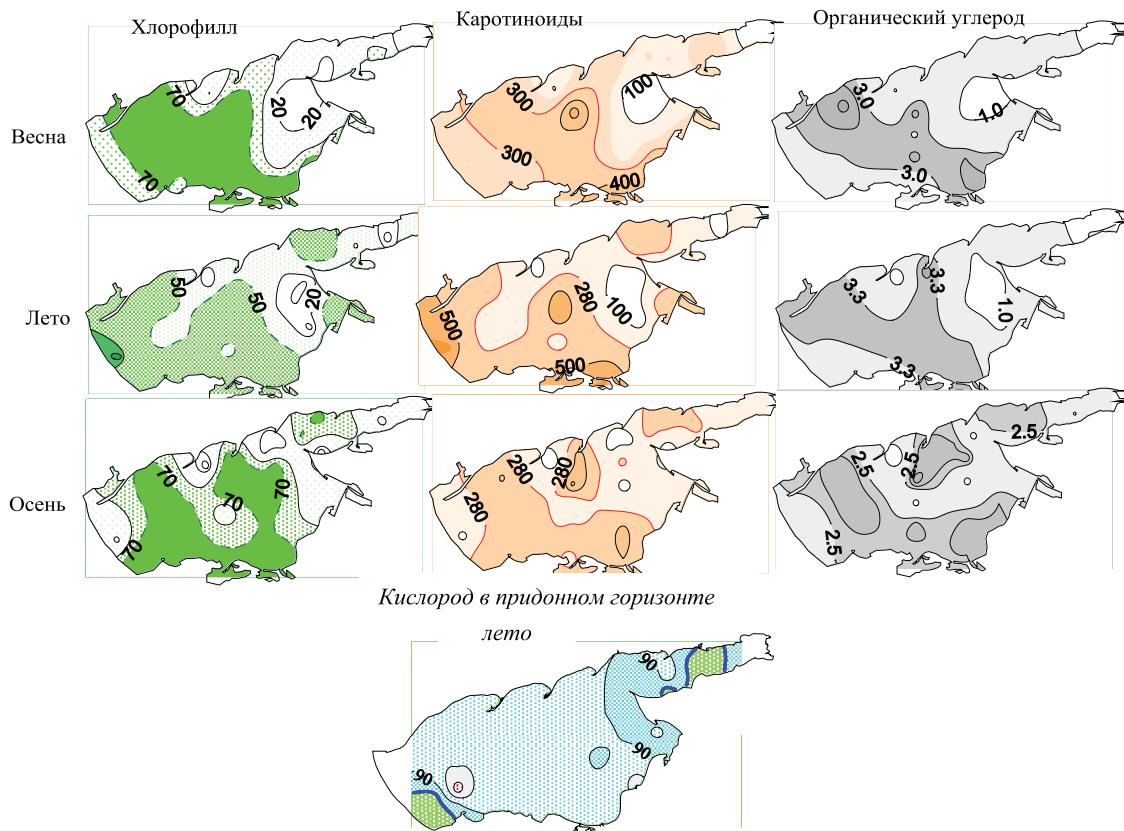


Рис. 4. Сезонная динамика хлорофилла «а» (мкг/г), каротиноидов (мкг/г) и органического вещества (%) в донных отложениях Азовского моря в 2014 г.

Таким образом, в условиях дефицита кислорода отмечено снижение уровня фитогенного органического вещества в донных отложениях Азовского моря, что обусловлено его повышенной бактериальной деструкцией. Косвенным подтверждением бактериальной сульфатредукции в условиях дефицита кислорода является высокое содержание в донных отложениях сульфидов. На рис. 3 показано накопление кислотоустойчивых сульфидов в областях критического снижения концентрации кислорода в придонном слое в летний период года.

В 2014 г. в крайнем западном районе собственно моря в летний период года наблюдали интенсивное цветение фитопланктона (концентрация хлорофилла «а» в воде увеличивалась до 36 мг/м^3), что привело к повышению содержания в донных отложениях хлорофилла «а» до 153 мкг/г и каротиноидов до 619 мкг/г . В авандельте Кубани также отмечено накопление каротиноидов, вследствие оседания отмерших клеток, пеллетов зоопланктона и остатков растительности, поступающих со стоком р. Кубань (рис. 4).

Осенью при активизации минерализации органического вещества, способствующего интенсивному фотосинтезу доминантов – диатомовых водорослей, возрастает количество взвешенного вещества в водной толще с последующей седиментацией его в донных отложениях. Активное осадконакопление отмечено в заморный 2013 г., что обусловлено оседанием и первичной деструкцией отмершего в летний период органического вещества, а также выносом дегрита течением из Таганрогского залива.

В Таганрогском заливе в 2013 г. закономерности распределения фитопланктона, характерные для собственно моря, не обнаружены, выраженного осадконакопления также не установлено. Это объясняется особенностью циркуляции водных масс в центре моря под влиянием силы Корiolиса, которая ответственна за вращение циклонов и антициклонов основного течения в Азовском море при ветрах северо-восточного направления, проходящего через Таганрогский залив в северную акваторию моря и далее направленного против часовой стрелки в центральную часть моря [9].

Отмеченное осадконакопление в западной части Таганрогского залива осенью 2014 г. также может быть обусловлено гидрологическими факторами, в частности течением при ветрах юго-западного направления.

Заключение

Анализ материалов по содержанию фитопигментов в Азовском море показал, что их значительная пространственно-временная изменчивость является отражением взаимодействия процессов новообразования и трансформации органического вещества в водной толще и донных отложениях. Пространственное осадконакопление в собственно море и Таганрогском заливе обусловлено гидрологическими и гидрометеорологическими факторами.

Пелитовые илы в донных отложениях Азовского моря являются источником органического вещества, потребляемого бентосными организмами и бактериобентосом, и способствуют формированию дефицита кислорода в Азовском море. В условиях гипоксии в летнее время года происходит снижение фитопигментов в донных осадках относительно весеннего периода, что обусловлено активизацией сульфатредуцирующих бактерий. В осенний период года после формирования летнего дефицита кислорода в придонном горизонте в собственно море отмечена выраженная седиментация и первичная деструкция отмершего в летний период органического вещества. Особенностью весеннего периода является высокое содержание хлорофилла «а», каротиноидов и органического углерода в донных отложениях в центральном и юго-восточном районах собственно моря, в связи с активными процессами осадконакопления в зимнее время года.

Список литературы

1. Номоконова В.И. Содержание фотосинтетических пигментов в воде и донных отложениях водоемов Самарской Луки / В.И. Номоконова // Самарская Лука. Проблемы региональной и глобальной экологии. – 2011. – Т. 20, № 2. – С. 54–70.
2. Закономерности распределения Сорг в донных отложениях российской части Азовского моря / Ю.А. Федоров [и др.] // Океанология. – 2009. – Т. 49, № 2. – С. 229–236.
3. Александрова З.В. Закономерности формирования кислородного режима и некоторые методические аспекты развития придонной гипоксии в Азовском море / З.В. Александрова, Т.Е. Баскакова, С.В. Долженко // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод: материалы научной конференции (с международным участием) (Ростов-на-Дону, 8–10 сент. 2015 г.). – Ростов-н/Д: Изд-во ГХИ, 2015. – С. 1–5.
4. Руководство по химическому анализу почв // Ред. Е.В. Аринушкина. – М.: Изд-во Московского университета, 1970. – С. 130–136.
5. Матишов Г.Г. Влияние геоморфологических особенностей дна Азовского моря на распределение бентоса / Г.Г. Матишов, В.В. Польшин, И.В. Шохин // Вестник Южного научного центра РАН. – М., 2010. – Т. 6, № 2. – С. 14–20.
6. Биологические процессы формирования рыбопродуктивности Азовского моря в современный период / Е.И. Студеникина, Л.М. Сафонова, З.А. Мирзоян [и др.]. – Ростов-н/Д: ФГУП «АзНИИРХ», 2010. – 172 с.
7. Толоконникова Л.И. Содержание органического вещества в донных отложениях Азовского моря / Л.И. Толоконникова, Е.И. Студеникина // Сб. научн. тр. АзНИИРХ «Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна». – 1998. – № 1. – С. 100–103.
8. Особенности развития биологических сообществ и кормовой базы планктоноядных и бентосоядных рыб в условиях осолонения Азовского моря (2007–2014 гг.) / З.А. Мирзоян З.А. [и др.] // Вопросы сохранения биоразнообразия водных объектов: материалы международной научной конференции (Ростов-на-Дону, 27 ноября 2015 г.). – Ростов-н/Д: Изд-во «АзНИИРХ». – 2015. – С. 237–243.
9. Гидрометеорологический справочник Азовского моря / под ред. А.А. Аксенова – Л.: Гидрометеоиздат, 1962. – 856 с.

References

1. Nomokonova V.I. Soderzhanie fotosinteticheskix pigmentov v vode i donnyx otlozheniyax vodoemov Samarskoj Luki / V.I. Nomokonova // Samarskaya Luka. Problemy' regional'noj i global'noj ekologii. – 2011. – T. 20, № 2. – P. 54–70.
2. Zakonomernosti raspredeleniya Sorg v donnyx otlozheniyax rossijskoj chasti Azovskogo morya / Yu.A. Fedorov [i dr.] // Okeanologiya. – 2009. – T. 49, № 2. – P. 229–236.
3. Aleksandrova Z.V. Zakonomernosti formirovaniya kislorodnogo rezhima i nekotorye metodicheskie aspekty' razvitiya pridonnoj gipoksiy v Azovskom more / Z.V. Aleksandrova, T.E. Baskakova, S.V. Dolzhenko // Sovremennye problemy' gidrokhimii i monitoringa kachestva poverhnostnyx vod: materialy' nauchnoj konferencii (c mezhdunarodnym uchastiem) (Rostov-na-Donu, 8–10 sent. 2015 g.). – Rostov-n/D.: Izd-vo GXI, 2015. – P. 1–5.
4. Rukovodstvo po ximicheskemu analizu pochv // Red. E.V. Arinushkina. – M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1970. – P. 130–136.
5. Matishov G.G. Vliyanie geomorfologicheskix osobennostej dna Azovskogo morya na raspredelenie bentosa / G.G. Matishov, V.V. Pol'shin, I.V. Shoxin // Vestnik Yuzhnogo nauchnogo centra RAN. – M., 2010. – T. 6, № 2. – P. 14–20.
6. Biologicheskie processy' formirovaniya ry'boproduktivnosti Azovskogo morya v sovremenennyj period / E.I. Studenikina, L.M. Safronova, Z.A. Mirzoyan [i dr.]. – Rostov-n/D: FGUP «AzNIIRX», 2010. – 172 p.
7. Tolokonnikova L.I. Soderzhanie organicheskogo veshhestva v donnyx otlozheniyax Azovskogo morya / L.I. Tolokonnikova, E.I. Studenikina // Sb. nauchn. tr. AzNIIRX «Osnovnye problemy' rybnogo khozyajstva i ohrany' rybohozjaistvennyx vodoemov Azovo-Chernomorskoj bassejna». – 1998. – № 1. – P. 100–103.
8. Osobennosti razvitiya biologicheskix soobshhestv i kormovoj bazy' planktonoyadnyx i bentsosoyadnyx ry'b v usloviyakh osoloneniya Azovskogo morya (2007–2014 gg.) / Z.A. Mirzoyan Z.A. [i dr.] // Voprosy' soxraneniya bioraznoobraziya vodnyx ob'ektov: materialy' mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (Rostov-na-Donu, 27 noyabrya 2015 g.). – Rostov-n/D.: Izd-vo «AzNIIRX». – 2015. – P. 237–243.
9. Gidrometeorologicheskij spravochnik Azovskogo morya / pod red. A.A. Aksenova – L.: Gidrometeoizdat, 1962. – 856 p.