

УДК 551.465

© В. Г. Бондур¹, В. А. Иванов², В. А. Дулов², Ю. Н. Горячкин², В. В. Замшин¹, С. И. Кондратьев², М. Е. Ли², В. С. Муханов³, Е. Е. Совга², А. М. Чухарев²

¹Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», г. Москва

²Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

³Институт морских биологических исследований имени А. О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

dulov1952@gmail.com

СТРУКТУРА И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПОДВОДНОГО ПЛЮМА ВБЛИЗИ СЕВАСТОПОЛЯ

Статья поступила в редакцию 14.03.2018, после доработки 21.06.2018.

В 2015—2016 гг. были выполнены комплексные исследования подводного плюма, наблюдаемого из космоса в районе основного глубинного стока г. Севастополь. В судовых экспедициях на сетке станций были получены вертикальные гидрологические профили, профили течений и оптических характеристик вод, а также отобраны пробы воды для химического и микробиологического анализа. Работы сопровождалась съёмками с бортов различных спутников. Достоверно показано, что плюм представляет собой слой мутных вод, вытянутые вдоль берега на расстояние в несколько километров и локализованные на глубине пикноклина. При подъеме пикноклина к поверхности плюм можно наблюдать в видимом диапазоне из космоса. Анализ контактных данных указывает, что существование плюма является следствием аварийного состояния подводного коллектора сбросовой системы. Это подтверждается и результатами анализа спутниковых изображений. Представлена оценка расположения предполагаемого разрыва трубопровода. В области источника загрязнений происходит отрыв объемов мутных вод от основного слоя и подъем их на морскую поверхность. Воды плюма по химическому составу соответствуют сточным канализационным водам. Существование плюма вблизи берега приводит к неблагоприятным экологическим последствиям, в частности, концентрация ионов аммония в районе плюма в 2 раза превышает предельно допустимую, а данные микробиологических анализов указывают на дестабилизацию микробного сообщества и деструктивные процессы в фитопланктоне, вызванные загрязнением.

Ключевые слова: заглубленные стоки, подводный плюм, судовые исследования, дистанционное зондирование, гидрооптические характеристики, антропогенные воздействия, химические и микробиологические загрязнения.

V. G. Bondur¹, V. A. Ivanov², V. A. Dulov², Yu. N. Goryachkin², V. V. Zamshin¹, S. I. Kondratiev², M. E. Lee², V. S. Mukhanov³, E. E. Sovga², A. M. Chukharev²

¹Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring "AEROCOSMOS", Moscow, Russia

²Marine Hydrophysical Institute of RAS, Russia, Sevastopol, Russia

³A. O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS, Sevastopol, Russia

STRUCTURE AND ORIGIN OF THE UNDERWATER PLUME NEAR SEVASTOPOL

Received 14.03.2018, in final form 21.06.2018.

In 2015—2016, comprehensive research was conducted on the underwater plume observed from outer space near Sevastopol in the area of the deep-water runoff. In ship expeditions vertical hydrological profiles, current velocity profiles and optical characteristics of water were obtained on the grid of stations, and water samples were taken for chemical and microbiological analysis. In-situ studies were accompanied by surveys from various satellites. It is reliably shown that the plume is a layer of turbid water, stretched along the coast for a distance of several kilometers and localized at the depth

Ссылка для цитирования: Бондур В. Г., Иванов В. А., Дулов В. А., Горячкин Ю. Н., Замшин В. В., Кондратьев С. И., Ли М. Е., Муханов В. С., Совга Е. Е., Чухарев А. М. Структура и происхождение подводного плюма вблизи Севастополя // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 4. С. 42—54.

For citation: Bondur V. G., Ivanov V. A., Dulov V. A., Goryachkin Yu. N., Zamshin V. V., Kondratiev S. I., Lee M. E., Mukhanov V. S., Sovga E. E., Chukharev A. M. Structure and origin of the underwater plume near Sevastopol. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11, 4, 42—54.

doi: 10.7868/S2073667318040068

of the pycnocline. Plume can be observed from Space in the visible range when the pycnocline rises up to the sea surface. An analysis of the data indicates that the existence of the plume is a consequence of emergency state of the underwater pipe of the wastewater discharge system, which is confirmed by the results of satellite image analysis. An estimate of location of the probable break of pipeline is obtained. In the area of the source of pollution, detachment of the pieces of turbid waters from the main layer and their lifting to the sea surface was revealed. Chemical composition of turbid waters corresponds to the sewage one. The existence of a plume near the coast leads to unfavorable ecological consequences, in particular, the concentration of ammonium ions in the plume region is 2 times higher than the maximum permissible level, and microbiological analyses indicates destabilization of the microbial community and destructive processes in phytoplankton caused by pollution.

Key words: deep runoffs, underwater plume, shipboard research, remote sensing, hydrooptic characteristics, anthropogenic impacts, chemical and microbiological contamination.

В прибрежных зонах могут существовать подводные плумы — мезомасштабные образования с аномальными по составу водами антропогенного или терригенного происхождения. Их общее теоретическое описание (динамика затопленных струй) содержится в ряде классических работ, например [1—3]. В настоящее время геофизическая модель Босфорского плума используется для анализа состояния Черного моря [4]. Если плум порождается глубинным сбросом канализационных вод, то целью сооружения подводной части сбросовой магистрали является его удержание в глубинных водах и недопущение подъема загрязнений в верхние слои водоема [3, 5]. При этом возникает вопрос о степени негативного воздействия глубинных стоков на экосистему и приобретает актуальность задача о моделировании явления — эволюции плума в вертикально-стратифицированной морской среде с учетом особенностей региона [3, 6]. При контроле состояния стоков и динамики плумов весьма полезными оказываются аэрокосмические методы [6—10]. При этом исключительно важно проведение комплексных натурных исследований физических и биохимических характеристик плумов сбрасываемых вод [11, 12]. Опыт экспериментальных наземно-космических исследований явления, а также результаты моделирования динамики сбрасываемых вод обобщены в работах [7—8], где также приведен обширный список литературы по этим проблемам.

В настоящей работе приводятся результаты исследования подводного плума, расположенного в районе основного сбросового устройства г. Севастополь. Диффузор сточной магистрали (заглубленная конечная часть) находится на расстоянии более 3 км от берега на глубине около 70 м, чтобы препятствовать подъему сточных вод в приповерхностные слои. В течение 2014—2016 гг. был проведен космический мониторинг этого района на основе детального анализа оптических многоспектральных изображений высокого и среднего разрешения (1—30 м на местности) со спутников Ресурс-П № 1, GeoEye, WorldView-2, WorldView-3, Landsat-7, Landsat-8, Sentinel-2A [13—15]. На изображениях выделялись области вод с аномальным спектром отражающей способности, который отличался от соответствующего спектра для фоновых участков водной поверхности [14—16]. Эти области естественно связать с подповерхностным плумом. Характерные изображения аномальных зон показаны на рис. 1 [17]. После нанесения контуров тринадцати выявленных зон на общую карту, была обнаружена их приуроченность к одному и тому же участку сточной магистрали, расположенному примерно в семистах метрах от берега. Тот факт, что этот участок оказался далек от конечной части трубопровода, расположенной в 3 км от берега, указывает на существование аварийного разрыва магистрали, как причины появления наблюдаемого плума.

В 2015—2016 гг. в районе локализации аномалий были проведены экспедиционные исследования с малотоннажного судна «Бирюза». На сетке станций были получены вертикальные гидрологические профили, профили течений и оптических характеристик вод, и отобраны пробы воды для химического и микробиологического анализа. В результате экспериментов и спутникового мониторинга возник набор данных, уникальный по мультидисциплинарному охвату характеристик явления.

В настоящей работе представлена полученная информация о структуре и составе плума вблизи Севастополя, подтверждено предположение о наличии аварийного разрыва магистрали, а также описана возникшая экологическая ситуация.

Методика и условия исследований. Судовые исследования проводились к югу от Гераклеийского полуострова в течение четырех экспедиций: 28—31.06.2015, 09-10.09.2015, 20—21.05.2016,

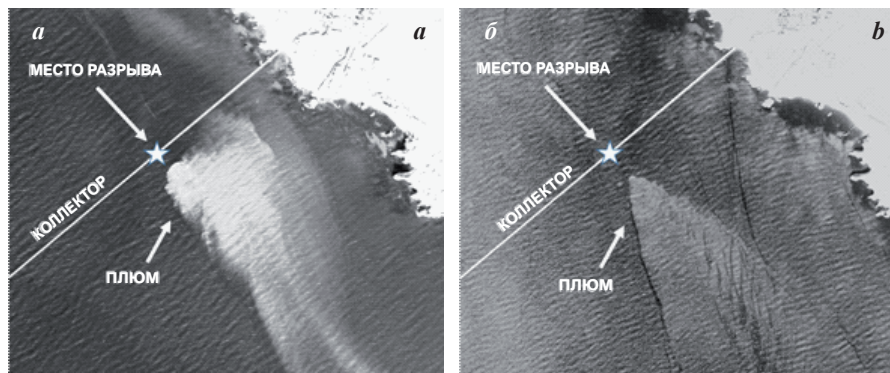


Рис. 1. Прибрежная акватория у г. Севастополь на оптических изображениях.
а — GeoEye, 23.01.2015, б — WorldView-2, 17.09.2017.

Fig. 1. Coastal water area near the Heracleian Peninsula on satellite optical images.
GeoEye, January 23, 2015 (a) and WorldView-2, September 17, 2017 (b).

12—13.09.2016. Район работ представлен на рис. 2, где также приведены сетки выполненных станций и обозначено положение коллектора сбросовой системы. На дрейфовых станциях регистрировались вертикальные профили температуры и солёности (автономными портативными CTD-зондами разработки Морского гидрофизического института РАН (МГИ)), векторы скорости течения (акустическим доплеровским измерителем ADCP WHM1200), спектры показателя ослабления направленного света (комплексами СИПО4, СИПО9), а также отбирались пробы воды. Гидрологические условия во время работ характеризовались четко выраженным скачком плотности воды, глубина которого изменялась от рейса к рейсу. Течение было направлено преимущественно вдоль берега, его скорость не превышала 15 см/с, а вертикальная структура нередко характеризовалась сменой направления течения на противоположное ниже верхней границы пикноклина. Из-за специфики используемого судна измерения выполнялись только в условиях относительно слабого ветра и в дневное время.

Целью первой экспедиции являлось получение крупномасштабного описания плюма. Поэтому сетка станций равномерно охватывала весь полигон при расстоянии между станциями около одной морской мили. В следующих трех рейсах работы проводились главным образом в области предполагаемого разрыва сточной магистрали, где расстояние между станциями было уменьшено до сотен метров. Эта область выделяется на рис. 2, б по сгущению точек станций. Она соответствует району локализации головной части плюма на спутниковых изображениях. В ней также наблюдались выходы загрязненных вод на поверхность моря. Далее будем называть ее «микрополигоном».

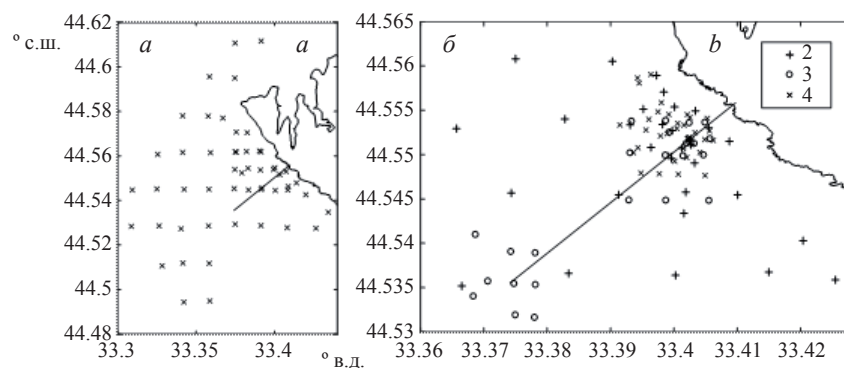


Рис. 2. Сетка станций.

а — 1-я экспедиция, б — 2-я, 3-я и 4-я экспедиции. Цифры — номер экспедиции, отрезок прямой — положение сточной магистрали.

Fig. 2. Locations of the ship stations during the 1st (a) and 2nd, 3rd and 4th (b) expeditions.
The straight line segment shows position of the sewage outfall pipe.

Аналогичные выходы загрязненных вод на поверхность в районе над диффузором сточной магистрали острова Санд (Гавайи) описаны в работах [7, 8]. В нашем же случае явление имело место у Гераклейского полуострова, но не над диффузором, а на микрополигоне. В первом рейсе не было замечено выходов мутных вод на поверхность, но в последующих рейсах обнаружилось, что в 7—8 часов утра по местному времени на поверхности воды в районе микрополигона появляются определенно идентифицируемые пятна мутно-желтого оттенка, которые существовали до ухода судна из района экспедиционных работ (16—17 часов местного времени). 13 сентября 2016 г. был визуально зафиксирован подъем мутных вод из глубины на поверхность — примерно в 8:14 возле борта судна на глубине около 5 м возникло светло-зеленое облако, которое дошло до поверхности несколькими минутами позже. По визуальным наблюдениям, граница пятен с чистыми водами характеризовалась отчетливым цветовым контрастом, причем пятна выглядели маслянистыми, поскольку там были подавлены мелкомасштабные шероховатости морской поверхности (рис. 3). Это описание пятен соответствует известным наблюдениям [7]. В областях пятен скапливались чайки, что облегчало обнаружение выходов мутных вод на поверхность при последующем возвращении судна в тот же район. Пятна имели горизонтальные размеры от нескольких метров до нескольких десятков метров. Расстояние от места проявления пятен на поверхности до берега не превышало километра.

Гидрофизическая структура плюма

Структура плюма по данным гидрооптических зондирований. При экспериментальных исследованиях подводных стоков острова Санд (Гавайи) [7, 8] и Геленджика [14] сточные воды удавалось идентифицировать с помощью гидроакустических зондирований. Однако, как показали наши экспедиционные работы с ADCP, плюм вблизи Севастополя не дает обратного рассеяния звука, аномального по отношению к фоновому. Для инструментальной идентификации подводного плюма оказались наиболее удобными оптические зондирования с помощью макетов приборов СИП9 и СИП4, изготовленных в МГИ [18, 19]. Измерялся показатель ослабления направленного света α , определяемый из закона спада $\exp(-\alpha x)$ для интенсивности света в мутной среде. Возрастание величины α по сравнению с фоновой в сине-фиолетовой области видимого диапазона спектра означает повышенное содержание органического вещества, растворенного в воде, в то время как возрастание в красной области означает повышенное содержание общей взвеси [20]. Приборы давали величину α в девяти (СИП9) и четырех (СИП4) спектральных интервалах, охватывающих диапазон видимого света, с разрешением по глубине соответственно 1 м и 10 см.



Рис. 3. Выходы сточных вод на морскую поверхность 20.05.2016.

Fig. 3. Photo of the surface anomaly spots caused by the deep-water discharge on May 20, 2016.

На вертикальных профилях $\alpha(z)$ плум выделялся, как слой повышенной мутности, где показатель ослабления света для всех оптических каналов возрастал в 2—3 и более раз (рис. 4). Видеосъемка с помощью подводной камеры, погружаемой вместе с зондирующим прибором, явно демонстрировала мутные воды внутри слоя на фоне прозрачных вод выше и ниже слоя. На рис. 4, *а* показаны профили $\alpha(z)$, полученные в ходе первой экспедиции. Область сгущения линий демонстрирует вертикальный ход α для чистых вод — возрастание примерно от 0.3 до 0.6 м^{-1} по мере приближения к поверхности. Аномальные отклонения соответствуют слоям мутных вод, которые можно выделять по превышению уровня (см. рис. 4, *а*, где соответствующий уровень показан прерывистой линией).

Вертикальная изменчивость показателя ослабления $\alpha(z)$ в областях мутных вод имела «слоистый» характер. Её типичный вид демонстрируется рис. 4. Над основным слоем мутных вод иногда наблюдались дополнительные пятна повышенного показателя ослабления света. Пример такого пятна приведен на рис. 4, *б*. Дополнительные пятна могли располагаться как ниже поверхности моря, так и доходить до поверхности, образуя на ней желтоватое пятно — область выхода загрязненных вод. Представление о горизонтальном масштабе этих пятен дает рис. 4, *в*, где показаны данные восьми последовательных зондирований, выполненных в течение 17 мин. Согласно данным GPS за это время судно сместилось по прямой на 110 м. Как следует из рисунка, масштаб пятна в направлении дрейфа близок к 10 м.

Плум и гидрологические характеристики. На рис. 5, *а* приведена зависимость глубины залегания основного слоя мутных вод от глубины пикноклина, построенная по всем данным. В качестве глубин пикноклина взяты горизонты максимума частоты Ваясяля—Брента. В третьей экспедиции последовательно проводились зондирования обоими оптическими комплексами, которые давали несколько различных профилей. Различия могли быть связаны как с временным сдвигом (порядка нескольких минут), так и с пространственным смещением судна из-за дрейфа (порядка десятков метров). Поэтому

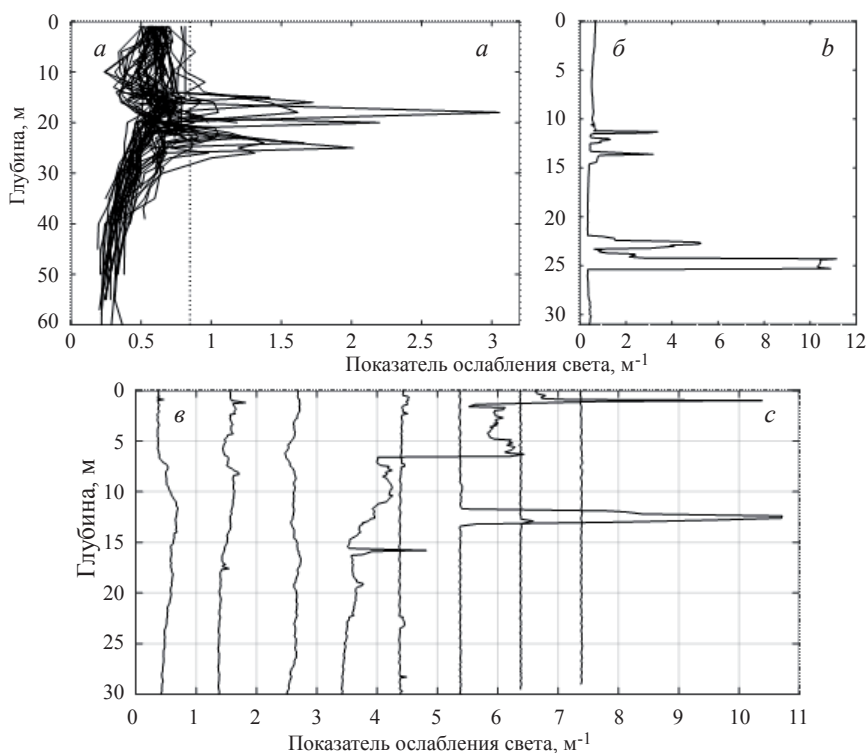


Рис. 4. Вертикальные профили показателя ослабления направленного света для канала 470 нм. *а* — профили, полученные 28—31.06.2015; *б* — дополнительное пятно мутных вод над основным слоем; *в* — данные последовательных зондирований в одной точке, каждый последующий профиль сдвинут на 1 м^{-1} вправо.

Fig. 4. Vertical profiles of the light attenuation coefficient ($\lambda = 470 \text{ nm}$). Profiles obtained on June 28—31, 2015 (*a*). Additional volumes of turbid waters above the main layer (*b*). Data of successive soundings at one point (*c*), each subsequent profile is shifted by 1 m^{-1} to the right.

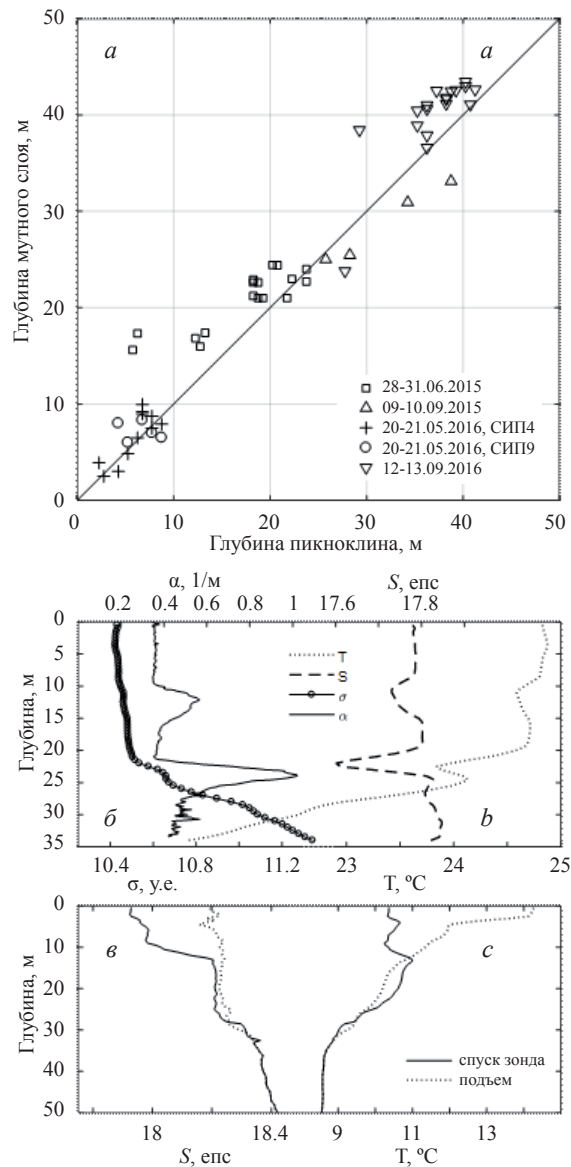


Рис. 5. Плюм и гидрологические характеристики.

a — связь глубины основного слоя мутных вод с глубиной пикноклина; *б* — профили показателя ослабления света (α), условной плотности (σ), температуры (T), солёности (S); *в* — температура (T) и солёность (S) в пятне выхода мутных вод на поверхность.

Fig. 5. Plume and hydrological characteristics.

Depth of the turbid water main layer versus the pycnocline depth (*a*). Profiles of the light attenuation index α , conditional density σ , temperature T , and salinity S (*b*). Temperature T and salinity S in the volume of turbid water lifting to the surface (*c*).

на рис. 5, *a* некоторым станциям 3-й экспедиции соответствуют две точки. Расстояния между ними характеризуют ошибки принятой методики анализа.

Как следует из рис. 5, *a*, наблюдаемый слой мутных вод всегда располагался в области пикноклина. Локализация слоев сточных вод в области пикноклина наблюдается как в модельных, так и в натурных экспериментах [7]. В наших экспериментах глубина залегания пикноклина существенно изменялась не только от экспедиции к экспедиции, но и в различные дни в пределах одной экспедиции. При этом глубины залегания слоев мутных вод всегда отслеживали изменчивость профилей плотности.

Мутные воды довольно трудно выделить по данным гидрологических зондирований [21]. Однако на ряде станций удалось зафиксировать аномалии солёности и температуры в слое мутных вод, их пятнах над пикноклином и пятнах их выходов на поверхность. На рис. 5, *б* дан пример случая (12 сентября 2016 г.), когда в слое 20—24 м, соответствующем области пикноклина, температура была на 1.0 °C,

а соленость на 0.2 епс ниже фоновых значений. В слое 8—12 м, соответствующем пятну мутных вод над пикноклинном, можно также видеть аномалии температуры и солености тех же знаков. На рис. 5, *в* (20 мая 2016 г.) приведены данные зондирования в области выхода мутных вод на поверхность. Зондирование было начато непосредственно в пятне выхода вод, и профили, полученные при зондировании вниз, демонстрируют аномалии -2°C по температуре и -0.2 епс по солености в верхнем слое от поверхности до глубины 13.5 м. При зондировании вверх через несколько минут судно уже вышло из области пятна из-за ветрового дрейфа, и были получены фоновые профили. Если наблюдаемые мутные воды сброшены из сточной магистрали, то они должны иметь меньшую соленость и температуру (в сезон, когда получены данные), чем морские воды. Именно таковы знаки аномалий на рис. 5, *б—в*. Отметим, что именно пониженная температура обеспечивает вертикальную устойчивость опресненного сточными водами слоя под поверхностным слоем более соленых морских вод.

Локализация и источник плюма. На рис. 6, *а* показаны положения станций, где наблюдался основной слой мутных вод по данным всех экспедиций. Отметим, что поле течений и гидрологические профили испытывали изменения даже в течение каждой экспедиции. Поэтому рисунок дает представление об области, где можно встретить слои мутных вод, но не о мгновенной локализации подводного плюма. Эта область вытянута вдоль берега на расстояние более 5 км. Она определенно смещена к берегу относительно диффузора сточной магистрали, над которым наблюдались чистые воды. Район пересечения этой области с трубопроводом, обозначенный на рис. 6, *а* прерывистой границей, рассмотрен подробно на рис. 6, *б*.

На рис. 6, *б* показаны точки, где наблюдались выходы мутных вод на поверхность. На том же рисунке показаны точки, где выявлены максимальные для каждой экспедиции значения показателя ослабления света в основном слое мутных вод. Сравнение рис. 6, *а* и *б* показывает, что наиболее мутные воды, а также их выходы на поверхность, сконцентрированы в существенно меньшей по площади области, чем область возможного распространения мутных вод. В этой области должен находиться источник загрязнений.

На рис. 6, *б* также показаны области, где плюм наблюдался из космоса, и положение источника загрязнения согласно анализу спутниковых изображений [14]. Как следует из рис. 6, выводы о локализации плюма и его источника, полученные по контактными измерениями и из анализа космических снимков совпадают. Источник расположен на расстоянии примерно 700 м от берега.

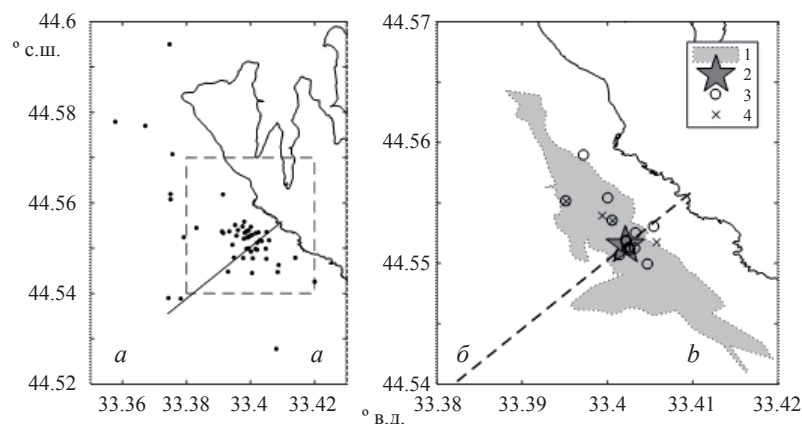


Рис. 6. Локализация и источник плюма.

а — точки контактных наблюдений слоев мутных вод, *б* — окрестность источника плюма
(1 — область спутниковых наблюдений плюма, 2 — положение источника по спутниковым данным,
3 — точки выходов мутных вод на поверхность, 4 — положения максимумов показателя ослабления света).

Fig. 6. Localization and the source of the plume. Locations of contact observations of turbid water layers (*a*). A region of the source of the plume (*b*),

1 — locations of satellite observations of the plume, 2 — the location of the source from satellite data,
3 — points of appearance of turbid waters on the sea surface, 4 — locations of the maxima of the light attenuation coefficient.

Итак, из анализа полученных данных следует, что плюм мутных вод вблизи Севастополя представляет собой слоистую структуру, толщиной от одного до нескольких метров, локализованную в пикноклине. Мутные воды распространяются на расстояния порядка километров из области их источника — вероятного разрыва сточной магистрали. В области, прилегающей к источнику, имеют место выходы мутных вод на поверхность, которые реализуются, как отрыв от основного слоя объемов мутных вод с горизонтальным размером в десяток метров и вертикальным размером в несколько метров, с последующим их всплытием на поверхность. Эта картина соответствует результатам обработки и анализа космических оптических изображений, которые в деталях представлены в работах [13—16]. При этом плюм, как обсужденный слой мутных вод, может наблюдаться в оптическом диапазоне из космоса только в случаях, когда пикноклин расположен достаточно близко к поверхности моря [6, 7, 16]. Из сформулированной общей картины явления следует важный для экологии района вывод — источником мутных вод является не диффузор (окончание) сточной магистрали, а элемент трубопровода, расположенный на расстоянии примерно 700 м от берега.

Химический состав плюма. В экспедициях пробы воды отбирались на каждой станции в поверхностном и придонном слоях толщиной 0.5—1 м. В третьей экспедиции пробы воды были взяты также в слое максимального ослабления света. Анализ проб выполнялся в береговой лаборатории, аттестованной на право проведения измерений физико-химических показателей природных и сточных вод. Использовались стандартные методики, рекомендованные МОК ЮНЕСКО [22, 23], и сертифицированные приборы, обеспеченные метрологической проверкой. В результате были определены содержания растворенного кислорода, фосфатов, силикатов, нитратов и нитритов, аммония, неорганического углерода TCO_2 , а также общая щелочность. На рис. 7 показаны примеры полученных полей гидрохимических элементов, а в таблице — аномалии гидрохимического состава в пятнах подъема мутных вод.

Естественные ливневые стоки в море в отличие от канализационных стоков должны содержать значительное количество нитратов из неорганических сельскохозяйственных удобрений. В то же время для канализационных вод характерны повышенное содержание фосфатов (из моющих средств), кремнекислоты (ее больше в пресных речных водах, чем в морских), ионов аммония (из-за разложения мочевины), особый кислородный режим (вследствие обилия биогенных элементов), а также аномалии величины щелочности и содержания общего неорганического углерода TCO_2 . Таблица показывает, что пятно мутных вод не связано с ливневыми стоками (содержание нитратов на уровне фонового), но обладает перечисленными свойствами канализационных вод, в особенности повышенным содержанием аммония.

Таблица 1

Содержание гидрохимических элементов в пятне выхода сточных вод на поверхность 20.05.2016

The content of hydrochemical elements in the surface spots of sewage caused by the deep-water discharge on May 20, 2016

Гидрохимический элемент	Фон по 9 станциям		до выхода пятна	в пятне	в пятне через 5 часов
	Пределы	Среднее			
Кислород, мл/л	6.57—6.69	6.61	6.86	6.90	6.78
Насыщение кислородом, %	104.9—105.9	105.3	104.7	105.2	97.1
TCO_2 , mM	2.989—2.995	2.991	2.985	2.997	3.098
Щелочность, мг-экв/л	3.320—3.331	3.327	3.370	3.333	3.346
pH	8.24—8.31	8.29	8.20	8.30	8.30
Фосфаты, мкМ	0.00—0.09	0.01	0.21	2.44	2.88
Кремнекислота, мкМ	2.3—3.2	2.5	2.6	5.88	5.91
Нитриты, мкМ	0.22—0.26	0.23	0.21	0.22	0.22
Нитраты, мкМ	1.19—1.69	1.40	1.22	1.30	1.67
Аммоний, мкМ	0.13—0.56	0.29	1.64	39.43	57.04

При этих измерениях первый отбор проб воды был выполнен до начала работы очистных сооружений. Примерно в 7:30 по местному времени вблизи судна всплыло пятно мутных вод, где был произведен второй отбор проб воды. Через пять часов судно возвратилось в ту же точку, было обнаружено пятно и сделан третий отбор проб. Выход пятна на поверхность вызвал увеличение содержания кремнекислоты в 2 раза, фосфатов — в 10 раз, аммония — в 25 раз. Со временем содержание этих элементов продолжало возрастать и для аммония превышение достигло 35 раз. Несколько повысились величины щелочности и TCO_2 , насыщение вод кислородом упало менее 100 % (при стабильных 105 % фоновых), тогда как на величины pH и концентрации нитратов и нитритов появление сточных вод влияния не оказало. Таким образом, источником мутных вод с высокой достоверностью являются канализационные стоки.

На рис. 7, б—д приведено поверхностное распределение гидрохимических элементов по съемке 10.09.2015 в сравнении с полем показателя ослабления направленного света (рис. 7, а). Как следует из этих данных, аномальные концентрации гидрохимических элементов наблюдались только в областях мутных вод, т. е. они характеризуют именно химический состав плюма. На рисунке также обозначено

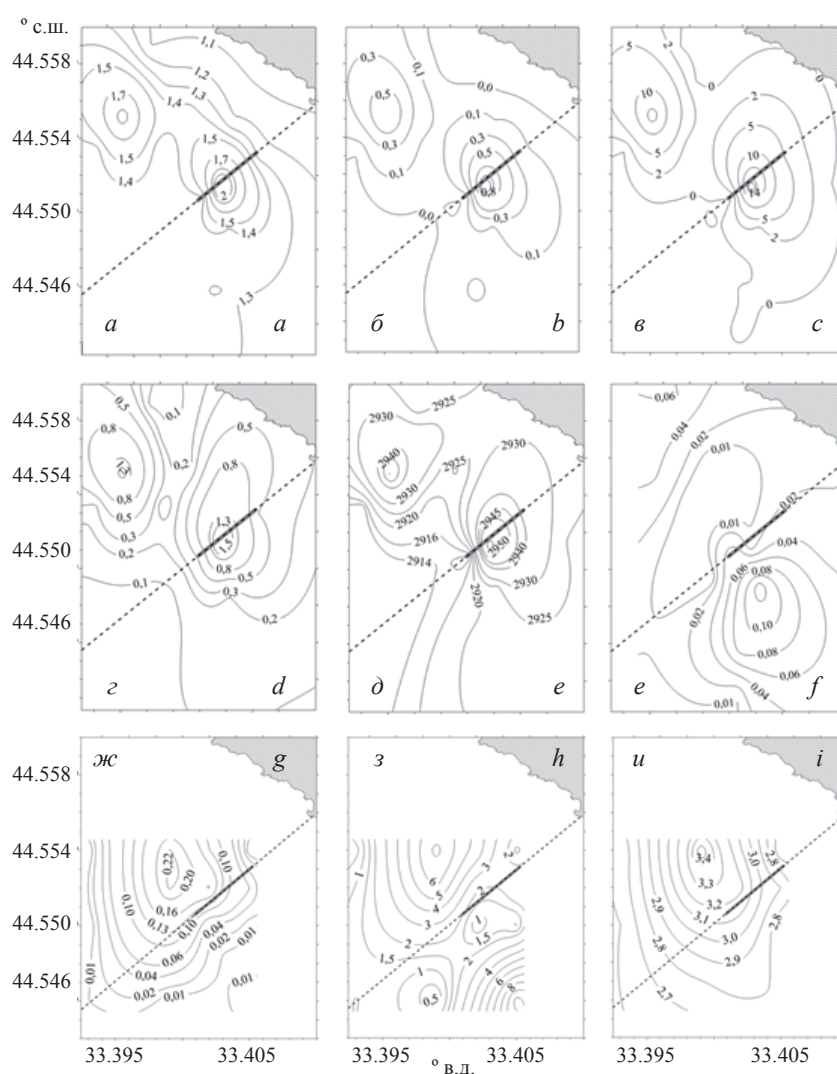


Рис. 7. Концентрация гидрохимических элементов в поверхностном слое 10.09.2015 (а—е) и слое повышенной мутности 20.05.2016 (жс—и). Показатель ослабления света ($\lambda = 370$ нм), м^{-1} (а); фосфаты, $\mu\text{М}$ (б, жс), аммоний, $\mu\text{М}$ (в, з), кремнекислота, $\mu\text{М}$ (д, и), TCO_2 , $\mu\text{М/л}$ (е), нефтеуглеводороды, мг/л (е).

Fig. 7. Concentration of hydrochemical elements in the surface layer on September 10, 2015 (a—f) and in the layer of increased turbidity on May 20, 2016 (g—i). Light attenuation coefficient ($\lambda = 370$ nm), m^{-1} (a); phosphate, μM (b, g), ammonium, μM (c, h), silicic acid, μM (d, i), TCO_2 , μM (f), petroleum hydrocarbons, mg/l (f).

положение трубопровода с выделенным проблемным участком, чтобы показать, что аномалии содержания гидрохимических элементов расположены именно вблизи проблемного участка. В мае 2016 г. отбор проб проводился также на промежуточном горизонте, соответствующем максимальному показателю ослабления света. Пространственные распределения гидрохимических элементов в этом слое (рис. 7, *ж—и*) показали те же особенности, что и для поверхностных пятен: для нитратов и нитритов распределения были равномерными; для фосфатов, кремнекислоты, аммония и ТСO_2 на промежуточном горизонте обнаружены более высокие концентрации по сравнению с фоновыми, причем аномалии располагались вблизи проблемного участка трубопровода.

В придонном слое наблюдался тот же характер распределений гидрохимических элементов. Например, поля для фосфатов и ионов аммония 10.09.2015 повторяли в общих чертах распределения в поверхностном слое, показанные на рис. 7, *б—д*, но с менее выраженными аномалиями — максимальное содержание фосфатов достигало 0.32 мкМ, а ионов аммония — 12 мкМ.

Отметим, что в каждой из экспедиций измерения гидрохимического состава вод выполнялись также на сетке станций в районе над диффузором. Но там не было обнаружено аномальных концентраций. В таблице в колонке «фон» приведены данные именно по 9 станциям, выполненным в тот же день в окрестности диффузора.

Таким образом, проведенный анализ полученных данных показывает, что воды, образующие плюм, являются разбавленными канализационными сточными водами. В результате в районе Гераклейского полуострова, в особенности в поверхностном слое моря, возникают области аномальных концентраций биогенных элементов. Эти области расположены не над диффузором сточной магистрали, а в 700 м от берега в окрестности проблемного участка подводного трубопровода.

Влияние плюма на экологическое состояние акватории. Предварительный экологический анализ полученных данных по химическому составу вод и их сравнение с архивными данными для прилегающей к Севастополю акватории был представлен в работе [24]. Было показано, что содержание фосфатов, аммония и кремния на микрополигоне к югу от Гераклейского полуострова превышает их содержание в бухте Южной, наиболее загрязненной бухте Севастополя. В наших исследованиях показано, что содержание аммония в пятнах всплывающих сточных вод значительно превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК) очищенной сточной воды, равную 27.7 мкМ/л (таблица). Избыточное поступление биогенных элементов может приводить к резкому увеличению продукции фитопланктона и далее к эвтрофикации, а при определенных ситуациях и к локальным заморным явлениям. При совокупном воздействии различных загрязняющих веществ на естественные биологические сообщества может существенно трансформироваться структура экосистемы и возникнуть нарушения нормального функционирования биоценозов.

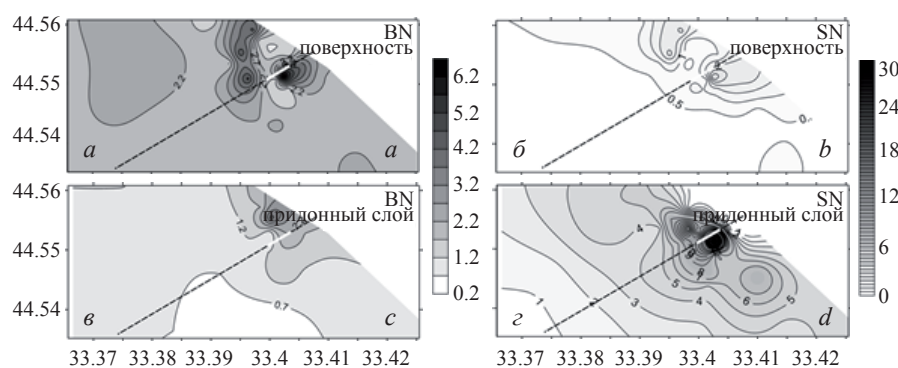


Рис. 8. Пространственное распределение микробиологических элементов.

Численность бактериопланктона (BN, 105 кл/мл) в поверхностном (*a*) и придонном (*в*) слоях. Численность пикцианобактерий рода *Synechococcus* (SN, 103 кл/мл) в поверхностном (*б*) и придонном (*г*) слоях. Прерывистая линия — положение трубопровода, отрезок сплошной белой линии — предполагаемый проблемный участок.

Fig. 8. Spatial distribution of microbiological variables. Abundance of bacterioplankton (BN, 105 cells/ml) in the surface (*a*) and bottom (*c*) layers. Abundance of picocyanobacteria *Synechococcus* (SN, 103 cells/ml) in the surface (*b*) and bottom (*d*) layers. Dashed line represents the position of the submerged pipeline. White segment is the probable localization of the wastewater leakage.

Отобранные при проведении экспериментов на станциях пробы воды были использованы также для микробиологического анализа. Количественные показатели бактерио- и пикофитопланктона определяли с помощью проточного цитометра CytomicsTM FC 500 (Beckman Coulter, США), оборудованного однофазным аргонным лазером с длиной волны 488 нм. Бактерии определялись в пробах, окрашенных SYBR Green I (Molecular Probes, США) согласно методике [25]. Идентификацию кластеров пикоцианобактерий рода *Synechococcus* и эукариотных пиководорослей в пространстве цитометрических переменных проводили в соответствии с работами [26, 27]. Численность, биомассу и таксономический состав фитопланктона определяли методами световой микроскопии [28].

На рис. 8 показаны пространственные распределения численности бактериопланктона и пикоцианобактерий рода *Synechococcus*. В пятне выхода мутных вод на поверхность 10.09.2015 наблюдались повышенные значения общей численности бактерий — до 0.65×10^6 кл. мл⁻¹, которые, по-видимому, были обусловлены поступлением в акваторию аллохтонного органического вещества и биогенов (рис. 8, а). В этой же части полигона выделялась область высокой численности пикоцианобактерий *Synechococcus* ($1.7\text{—}3.1 \times 10^4$ кл. мл⁻¹) в придонном слое (рис. 8, з). Все области обнаруженных высоких концентраций микроорганизмов элементов прилегали не к диффузору, а к проблемному участку трубопровода. В этой же области были выявлены обеднённость таксономического состава фитопланктона, увеличение вклада мелких форм в суммарную биомассу и численность сообщества и замещение диатомовых водорослей динофитовыми.

Анализ полученных результатов показал, что район окрестности проблемного участка трубопровода достоверно отличался от прилегающей акватории по микробиологическим показателям и характеризовался более широким диапазоном вариабельности и более высокими максимумами обилия микроорганизмов. Это указывает на дестабилизацию микробного сообщества в результате локального повреждающего воздействия на экосистему акватории и, возможно, на деструктивные процессы в фитопланктоне, вызванные загрязнением.

Во второй, третьей и четвертой экспедициях отобранные на станциях пробы воды были использованы также для анализа на содержание нефтеуглеводородов. Методика анализа детально описана в работе [29]. Обнаружено, что содержание нефтеуглеводородов в районе к югу от Гераклеийского полуострова имеет сезонную изменчивость, причем, осенью содержание нефтеуглеводородов превышает ПДК и ситуация становится неблагоприятной по экологической нагрузке в отношении нефтепродуктов. По-видимому, это связано не только с предполагаемым аварийным разрывом сточной магистрали. Однако область наибольшей концентрации нефтепродуктов прилегает именно к проблемному участку трубопровода. На рис. 7, е показано поле содержания нефтеуглеводородов в поверхностном слое по данным второй экспедиции, причем в придонном слое наблюдалось подобное поле. Похожие картины получены по данным третьей и четвертой экспедиций. Это обстоятельство, во всяком случае, усугубляет экологическое неблагоприятие района, вызываемое аварийным участком трубопровода.

В результате комплексных наземно-космических исследований подводного плюма вблизи Севастополя получены достоверные данные о гидрофизической структуре плюма, его составе, происхождении и влиянии на экологию района. Анализ данных, выполненный в данной статье, приводит к следующим выводам.

1. Подводный плюм выявлен в прибрежной полосе длиной около пяти километров и шириной около полутора километров, расположенной на расстоянии 500—600 м от берега. По вертикальной структуре плюм представляет собой слои толщиной от метра до нескольких метров, локализованные в области пикноклина. Над основным слоем также существуют объемы вод плюма с горизонтальным размером порядка десятка метров и вертикальным размером в несколько метров, всплытие которых приводит к явлению выхода глубинных стоков на морскую поверхность.

2. Благодаря содержанию в плюме взвеси и растворенного органического вещества возможна идентификация вод плюма по оптическим характеристикам вод. Это облегчает натурные исследования плюма и дает возможность обнаруживать плюм из космоса в оптическом диапазоне спектра электромагнитных волн с использованием съёмочной аппаратуры высокого и среднего пространственного разрешения (1—30 м) в случаях, когда пикноклин расположен достаточно близко к поверхности моря.

3. На основании анализа результатов измерений химических и микробиологических характеристик показано, что подводный плюм в районе глубинного стока у г. Севастополь формируется сточными канализационными водами.

4. Проведенный анализ данных позволяет утверждать, что плюм связан не со штатным сбросом сточных вод через диффузор подводной магистрали от очистных сооружений, а с дополнительным локальным источником загрязнений из-за аварийного повреждения магистрали, причем участок разрыва подводного трубопровода расположен на расстоянии примерно 700 м от берега.

5. Существование плюма негативно влияет на экологическое состояние района. Содержание ионов аммония в областях выхода сточных вод на поверхность превышает ПДК (в 1.4—2.1 раза), а по ряду гидрохимических элементов район оказывается в большей степени загрязненным, чем бухта Южная, наиболее проблемная в экологическом отношении часть Севастопольской бухты. Уже сейчас район достоверно отличается от прилегающей акватории по микробиологическим показателям, что указывает на дестабилизацию микробного сообщества и, возможно, на деструктивные процессы в фитопланктоне, вызванные загрязнением.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для углубления и конкретизации научных представлений о явлении подводного плюма сточных вод, для разработки его численной модели с учетом гидрологических особенностей района, а также могут быть полезны при натурных исследованиях структур примесей, взвешенных в толще вод. Работа предоставляет основания для ликвидации выявленного аварийного положения.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 гг.» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57716X0234), а также по темам государственных заданий № 0827-2014-0010 и № 0828-2014-0016.

Литература

1. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977. 431 с.
2. Озмидов Р. В. Диффузия примесей в океане. М.: Гидрометеиздат, 1986. 280 с.
3. Бондур В. Г., Журбас В. М., Гребенюк Ю. В. Математическое моделирование турбулентных струй глубинных стоков в прибрежные акватории // Океанология. 2006. Т. 46, № 6. С. 805—820.
4. Samodurov A. S., Ivanov L. I. Processes of ventilation of the Black Sea related to water exchange through the Bosphorus // Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea. NATO / ASI Series. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1998. V. 2. P. 221—236.
5. Моделирование процессов самоочищения вод шельфовой зоны моря / Под ред. В. И. Зац и Г. А. Гольдберг. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. 230 с.
6. Бондур В. Г., Гребенюк Ю. В. Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглуженными стоками: моделирование, эксперименты // Исследование Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49—67.
7. Bondur V. G. Satellite Monitoring and Mathematical Modelling of Deep Runoff Turbulent Jets in Coastal Water Areas / Waste Water - Evaluation and Management, ISBN 978-953-307-233-3, InTech, Croatia, 2011, pp. 155—180.
8. Bondur V. Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. 7 p.
9. Keeler R., Bondur V. and Gibson C. Optical Satellite Imagery Detection of Internal Wave Effects from a Submerged Turbulent Outfall in the Stratified Ocean // Geophys. Res. Lett. 2005. 32, L12610, doi: 10.1029/2005GL022390
10. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Мутягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России: М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
11. Bondur V., Tsidilina M. Features of Formation of Remote Sensing and Sea truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas. 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 192—195.
12. Бондур В. Г., Филатов Н. Н., Гребенюк Ю. В., Долотов Ю. С., Здоровеннов Р. Э., Петров М. П., Цидилина М. Н. Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // Океанология. 2007. Т. 47, № 6. С. 827—846.
13. Дулов В. А., Юровская М. В., Козлов И. Е. Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 43—60.
14. Бондур В. Г., Воробьев В. Е., Замишин В. В., Серебряный А. Н., Латушкин А. А., Ли М. Е., Мартынов О. В., Хурчак А. П., Гринченко Д. В. Мониторинг антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря по многоспектральным космическим изображениям // Исследование земли из космоса. 2017. № 6. С. 3—22.
15. Bondur V. G., Zamshin V. V. Comprehensive Ground-Space Monitoring of Anthropogenic Impact on Russian Black Sea Coastal Water Areas // K. V. Anisimov et al. (eds.), Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Research and Development — 2016”, 2018. P. 625—637. doi: 10.1007/978-3-319-62870-7.

16. Бондур В. Г., Зубков Е. В. Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многозональным спутниковым изображениям высокого разрешения. Часть 1. Эффекты сброса дренажных каналов в прибрежные акватории // Исследования Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54—61.
17. Электронный ресурс DigitalGlobe ImageFinder, URL: <https://browse.digitalglobe.com/>, 2017 (дата обращения: 15.12.2017).
18. Ли М. Е., Латушкин А. А., Мартынов О. В. Использование светодиодных квазимонохроматических источников света в аппаратуре для гидрооптических исследований // Системы контроля окружающей среды / Под. ред. В. А. Гайского. Севастополь: НПП «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2010. С. 19—21.
19. Lee M. E., Latushkin A. A., Martynov O. V. Development of a method and an instrument for the assessing of suspended and dissolved organic matter in seawater by measuring the beam attenuation coefficient from the near UV to the red // Proceedings of VII International Conference “Current Problems in Optics of Natural Waters” (ONW’2013). St.-Peterburg, Russia, Nauka, 2013. P. 244—247.
20. Jerlov N. G. Optical measurements in the eastern North Atlantic // Medd. Oceanogr. Inst. Goteborg. 1961. Ser. B, 8. 40 pp.
21. Keeler R., Bondur V., Vithanage D. Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // Sea Technology, April, 2004. P. 53—58.
22. Методы гидрохимических исследований океана / Под ред. Бордовского О. К., Иваненкова В. Н. М.: Наука, 1978. 272 с.
23. Chemical methods for use in marine environmental monitoring. Intergovernmental Oceanographic Commission. Manuals and guides. N 12. Unesco, 1983. 53 p.
24. Совга Е. Е., Кондратьев С. И., Годин Е. А., Слепчук К. А. Сезонная динамика содержания и локальные источники биогенных элементов в водах прибрежной акватории Гераклеяского полуострова // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 1. С. 56—67.
25. Gasol J. M., Del Giorgio P. A. Using flow cytometry for counting natural planktonic bacteria and understanding the structure of planktonic bacterial communities // Scientia Marina. 2000. Т. 64, № 2. С. 197—224.
26. DuRand M. R. et al. Phytoplankton population dynamics at the Bermuda Atlantic Time-series station in the Sargasso Sea // Deep Sea Res. 2001. II 48, 1983—2003.
27. Marie D., Simon N., Vaulot D. Phytoplankton cell counting by flow cytometry // Algal cult. techn. 2005. P. 253—268.
28. Сеничкина Л. Г. Вычисление объёмов клеток диатомовых водорослей с использованием коэффициентов объёмной полноты // Гидробиол. журн. 1986. 22, № 1. С. 56—59.
29. Иванов В. А., Катунина Е. В., Совга Е. Е. Оценки антропогенных воздействий на экосистему акватории Гераклеяского полуострова в районе расположения глубинных стоков // Процессы в геосредах. 2016. № 5 (1). С. 62—68.