

УДК 551.465, PACS: 92.10.A–, 92.10.Zf

АПВЕЛЛИНГИ И ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОД СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2017 ГОДА

Ю. И. Попов, А. В. Матвеев

Филиал государственного учреждения «Госгидрография» - «Одесский район Госгидрографии», пер. Маячный, 5, 65038, Одесса, Украина, ocean@hydro.od.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3549-3410>

На основании материалов спутниковых, натуральных атмосферных и морских наблюдений рассмотрены циркуляционные процессы в водах северо-западного шельфа (СЗШ) Черного моря в летний период 2017 года. Отмечается высокая устойчивость летних сгонных ветров северных и северо-северо-западных направлений и, как следствие, 12 случаев прибрежных апвеллингов. Три случая апвеллинга удалось инструментально зафиксировать на поперечных берегу океанографических разрезах при выполнении сезонных полигонных работ океанографическим подразделением ФГУ «Одесский район Госгидрографии» (ГУ «Госгидрография»). Уплотнение прибрежных вод привело к аномально активному переносу вдоль побережья вод Дунай-Днестровского междуречья в самые северные районы СЗШ. В 2017 году визуально проявился антициклонический характер крупномасштабной летней циркуляции вод СЗШ. Полученные данные подтверждают ранее сделанные выводы по климатическим данным о частых случаях смены в летние периоды года традиционной циклонической циркуляции вод на антициклоническую.

Аномальное развитие летнего циркуляционного режима позволило впервые отметить перенос фитопланктона группы кокколитофорид из открытого моря в северные районы СЗШ, а также выявить его внутрисезонную пространственную трансформацию и продолжительность развития процесса.

В мористой части Одесского залива обнаружено часто повторяющееся вихревое образование циклонической завихренности с пространственными размерами до 7-8 миль и с орбитальными скоростями по представленным данным $0.12-0.18 \text{ мс}^{-1}$, а по данным последних полевых работ – свыше 0.30 мс^{-1} .

Ключевые слова: северо-западный шельф Черного моря, апвеллинг, геострофические течения, трассер, цветение кокколитофорид, спутники Sentinel-2 и Landsat-8.

1. ВВЕДЕНИЕ

В северных и западных мелководных районах северо-западного шельфа (СЗШ) квазипостоянные течения характерны для зимнего периода года. Термохалинная составляющая течений в этот период, с одной стороны, ослабляется усилением вертикальной однородности вод, а с другой, усиливается за счет более активного распространения вод днепро-бугского стока в юго-западном направлении под действием преобладающих ветров северо-восточной четверти. В теплое полугодие, как правило, преобладают временные или периодические течения, которые вызываются различными непостоянно или периодически действующими факторами и изменчивы по направлению и скорости. Летние течения в мелководных регионах СЗШ существенно зависят от ветровых условий с выраженной изменчивостью синоптического масштаба (5-10 суток). Однако, инерционность морской среды столь велика, что ветровые условия лишь эпизо-

дически формируют переносы вод в приповерхностном слое. В подповерхностных, а тем более в глубинных слоях моря, основную роль играют термохалинные факторы. Глубинные течения с существенной задержкой реагируют на синоптическую изменчивость ветра. В большей мере они являются реакцией на вызванные, в том числе и ветром, структурные изменения водных масс, а также существенно зависят от характера прибрежной батиметрии и ориентации ветра относительно береговой линии. Все сказанное свидетельствует о том, что характер движений вод в северных прибрежных районах СЗШ можно отнести в разные периоды года к квазипостоянным или квазипериодическим течениям.

Существуют внешние и внутренние силы генерации прибрежных морских течений. Помимо ветра на развитие течений может оказывать влияние и неравномерность в поле атмосферного давления, а также гидравлическое давление при подвижках относительно масштабных динами-

ческих образований открытого шельфа.

Относительно одинаковая направленность береговой линии от основания Жебриянской бухты до района п. Одесса казалось бы не должна вызывать существенных изменений в поле течений. Но неоднородности в поле ветра и донного рельефа вызывают существенные отклонения. Батиметрия северного побережья более однородна, с равномерным уменьшением поперечных перепадов глубин в восточные районы.

В работах [1-4] рассмотрена внутри- и межгодовая изменчивость распространения вод различных градаций солености по СЗШ. Как правило, существенное осреднение солености по климатическим данным не выявляет каких-либо особенностей изменения циркуляционной структуры вод за счет сгонно-нагонных явлений в прибрежных зонах. В настоящем исследовании предлагается на локальном участке побережья (по гидрофизическим наблюдениям) и в целом по СЗШ (на основании детальных спутниковых изображений) рассмотреть вопрос о роли сгонных явлений в формировании прибрежной циркуляции и переносе вод разгрузки Дуная и Днестра в северные районы СЗШ.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для исследования крупномасштабных процессов переноса водных масс на СЗШ существенную помощь оказали снимки высокого разрешения, полученные из архивов европейских (спутник Sentinel-2, пространственное разрешение 10 м) и американских (спутник Landsat-5,7,8 разрешение 30 м) космических агентств [5, 6].

Для получения количественных характеристик течений и глубоководной структуры вод в некоторых районах СЗШ использовались совпадающие по времени данные морских океанографических съемок, выполненных в 2017 г. сотрудниками ФДУ «Одесский район Госгидрографии».

Анализ температурного режима поверхностных вод и ветровых условий над водной поверхностью производился на основании гидрометеорологических данных Гидрометцентра Черного и Азовского морей (ГМЦ ЧАМ) и модельных данных, представленных на Морском портале Морского гидрофизического института (МГИ) [7].

3. АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ

Зимние атмосферные условия 2017 г. традиционно сопровождалась устойчивыми ветрами северных направлений. В весенний период пере-

стройки барического поля преобладали слабые ветры переменных направлений. Отличительной особенностью всего летнего периода 2017 г. была аномально высокая повторяемость умеренных и сильных северо-западных ветров. В таблице 1 приведены средние параметры ветра летнего периода на траверзе пяти береговых пунктов западного побережья СЗШ: Одесса; Черноморск; Цареградское гирло; Приморское; и Усть-Дунайск. Средние величины оценены по данным модельных расчетов параметров ветра, представленных на Морском портале МГИ.

Таблица 1 – Параметры среднего ветра в период сгонных явлений 2017 г. в пяти точках западного побережья СЗШ (14.05 – 02.09.2017г.)

	Средний вектор		Сред. ариф. скорость, мс ⁻¹	Устойчивость, %
	Направление, град.	Скорость, мс ⁻¹		
Одесса	345	1.3	3.3	39
Черноморск	343	1.4	3.7	38
Днестр	351	1.5	3.8	39
Дунай-Днестр	355	1.4	4.0	35
Дунай	005	1.5	4.3	35

Высокая устойчивость летних сгонных ветров эпизодически нарушалась ветрами противоположного нагонного направления, но эти ситуации были немногочисленны и непродолжительны. С севера на юг отмечалось усиление среднеарифметической скорости ветра с 3.3 до 4.3 мс⁻¹ и незначительное уменьшение устойчивости потоков с 39 до 35 %.

В результате воздействия сгонных ветров наблюдались частые случаи прибрежных апвеллингов, вызывающих подъем к поверхности холодных и соленых глубинных вод. При этом происходило уплотнение вод вдоль всего западного побережья СЗШ и формирование в приповерхностном слое вдольбереговых геострофических переносов вод в генеральном северо-восточном направлении.

Определить у какого из участков береговой черты происходили апвеллинги можно только на основе анализа совокупности данных многочисленных спутниковых изображений (прежде всего термических), ветровых, термических и халинных данных ближайших гидрометеорологических станций, а также по натурным морским наблюдениям. Последние дают эпизодические картины, но с описанием внутренней структуры происходящих процессов.

Гидрометеорологический буй SWMidi-185 два года устанавливался на стыке двух генеральных направлений береговой линии (у мыса Ланжерон Одесского залива).

Предполагалось, что в большой мере его измерения должны отражать процессы происходящие вдоль южного участка береговой линии, но оказалось, что при длительных ветрах северных направлений по данным его измерений могут быть идентифицированы и интенсивные апвеллинги, происходящие вдоль северных бере-

гов исследуемой акватории.

Все экстремумы минимальной температуры, зарегистрированные на бую, как правило, подтверждаются береговыми наблюдениями на МС «Одесса-Порт» и ГП «Южный» (рис. 1, табл. 2). К сожалению, температурные оценки не могут быть подтверждены данными по солености из-за выхода из строя датчика электропроводности (солености) на бую в апреле месяце 2017 г. Не подлежат анализу и данные солености береговых станций, ввиду их неудовлетворительной дискретности и качества.

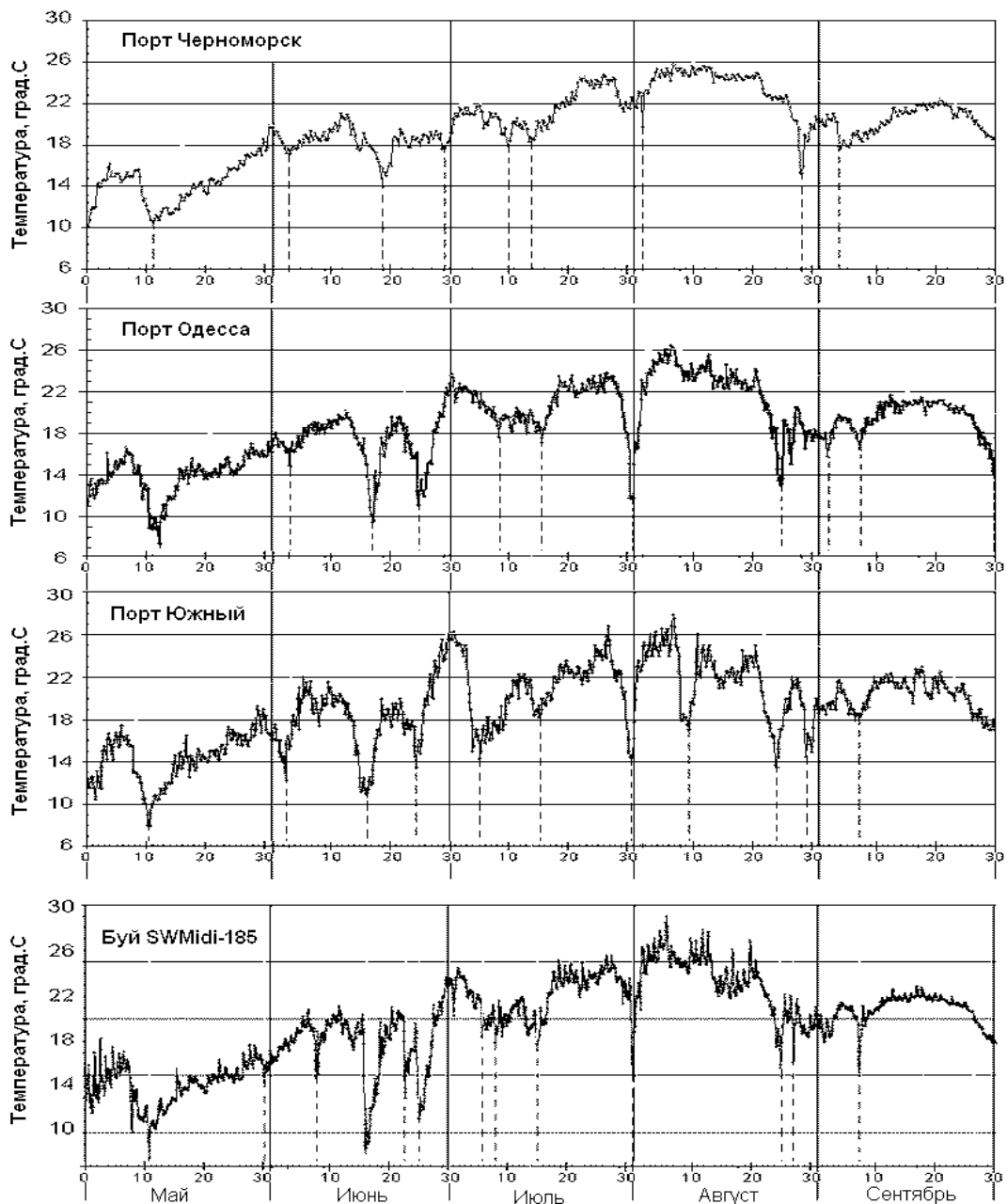


Рис. 1 – Временная изменчивость температуры воды в период с мая по сентябрь 2017 г. по данным морских станций портов Черноморск, Одесса, Южный и гидрометеорологического бую SWMidi-185

Таблица 2 – Общие сведения об апвеллингах по данным гидрометеорологического буя и МС «Одесса-Порт» (по температуре воды)

№№ п/п	Период	Качественная оценка процесса	Экстремум температуры воды по данным буя, °С	Экстремум температуры воды по данным МС Одесса-Порт, °С
1	8-15.05	продолжительный	08.0	08.0
2	8-9.06	кратковременный	14.5	отсутствует
3	16-19.06	сильный	08.5	08.5
4	23-24.06	не сильный	13.0	15.0
5	25-29.06	сильный	11.0	11.0
6	01-02.07	не сильный	20.0	20.0
7	04-11.07	не сильный	18.0	18.0
8	13-17.07	не сильный	17.3	17.3
9	31.07-02.08	сильный	16.0	12.0
10	25-26.08	не сильный	16.0	13.0
11	27-28.08	не сильный	16.0	15.0
12	07-08.09	не сильный	15.8	16.2

В летний сезон (с 08 мая по 08 сентября) 2017 года было отмечено свыше десяти случаев прибрежных апвеллингов. Продолжительный апвеллинг имел место с 08 по 15 мая. Температура поверхностных вод на акватории Одесского порта понижалась с 16.5 до 8.0°С, а в непосредственной близости, по данным буя – до 7.5°С.

Наиболее сильные стонные явления и подъемы глубинных вод отмечались 16-19 июня, 25-29 июня и 31 июля – 02 августа, с температурами воды в порту 8.5, 11.0 и 12.0°С, соответственно. Остальные семь случаев понижения температуры прибрежных вод были не столь интенсивными. Следует отметить, что данные о поверхностной температуре воды в порту Одесса существенно лучше согласуются с данными МС порта Южный, нежели с данными ГМБ порта Черноморск.

По результатам измерений вертикальных распределений температуры и солености на поперечном берегу и повторявшемся 6 раз разрезе №3 полигона «Григорьевский (расположен на траверзе Большого Аджалыкского лимана) получена информация о трех случаях апвеллинга – 05 апреля, 16 июня и 06 сентября (рис. 2).

Вторая и третья ситуации совпали с представленными выше фактами прибрежного апвеллинга, а первая, в районе Одессы, не проявилась. По всем наблюдениям наиболее сильный апвеллинг имел место 16-19 июня, когда по данным океанографической съемки 16 июня на поверхность вышли воды с температурой менее 10.0°С и соленостью 17.8-17.9‰.

Подъем плотных вод в прибрежной зоне генерирует интенсивные вдольбереговые течения. В рассматриваемом случае (рис. 3) на горизонте 2 м имели место течения восточных направлений со скоростями до 0.25-0.35 мс⁻¹, а на горизонте 5 м – со скоростями 0.1-0.2 мс⁻¹. Уже на горизонте 10 м, под сезонным термоклином, течения резко ослабевали и на некоторых станциях имели обратную направленность.

Северо-восточные вдольбереговые течения западного побережья при развитии апвеллинговых явлений подхватывали значительные объемы вод дунайского, а севернее – и днестровского стока, и выносили их в самые северные районы СЗШ, т.е. в область проведения исследований. Ярким подтверждением этого явились визуальные цветосинтезированные спутниковые снимки морской поверхности высокого разрешения (спутники Landsat-7,8 и Sentinel-2) (рис. 4 а-з). Наиболее выражено подобная ситуация наблюдалась в первой декаде июня (рис. 4а). В широкой 20-мильной вдольбереговой зоне дунайские воды распространялись от Килийского устья вплоть до траверза Цареградского гирла. Севернее подхватывались воды днестровской разгрузки, поток постепенно сужался, и уже в мористой части Одесского залива образовывал визуально интенсивный циклонический вихрь.

Используя архив данных о ветровом режиме в Одессе за последний 37 летний период, были построены все годовые прогрессивно-векторные диаграммы ветра и выявлены годы

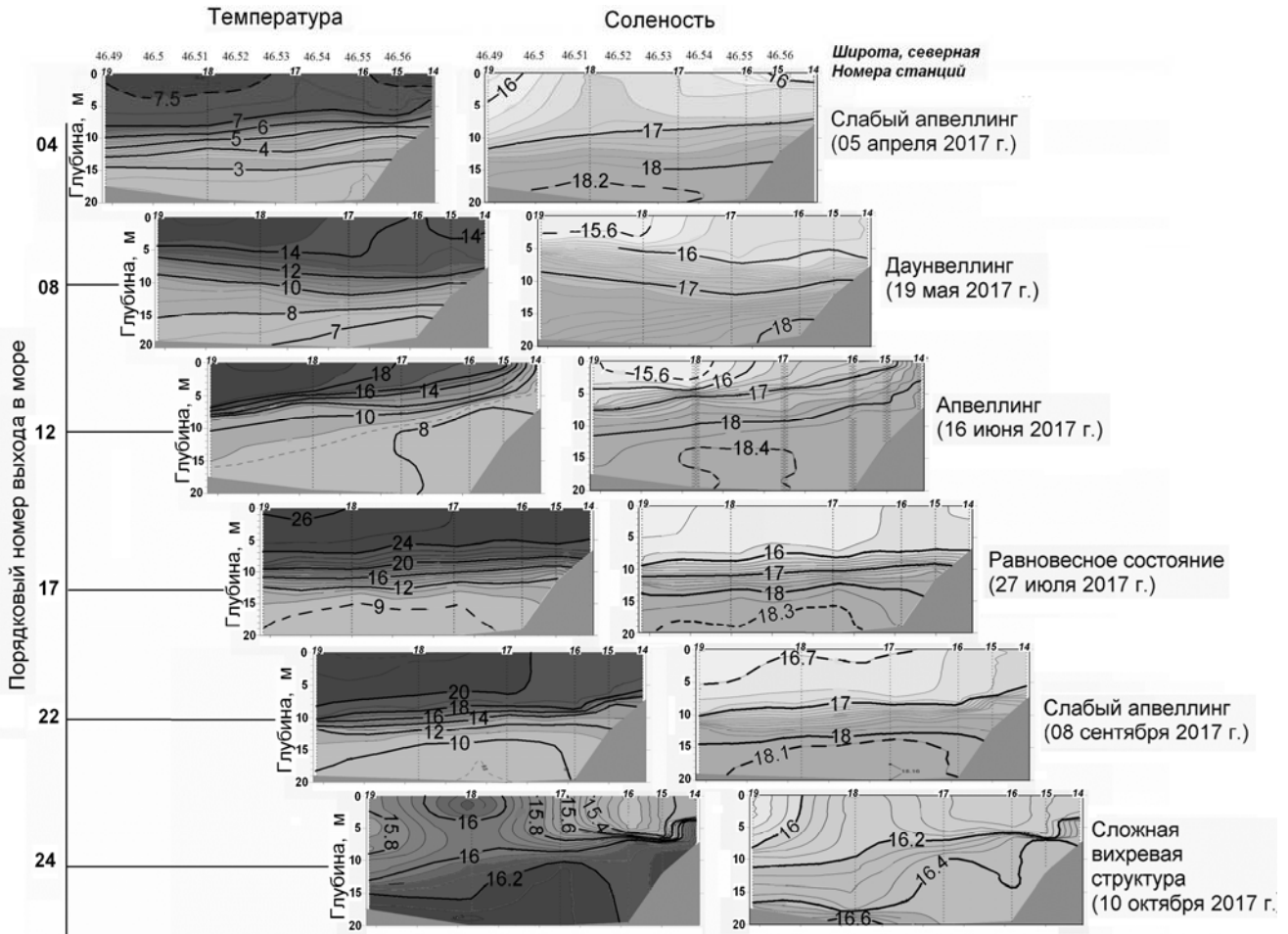


Рис. 2 – Наборы вертикальных распределений температуры, °С, (слева) и солёности, ‰, (справа) воды на последовательно выполненных разрезах №3 полигона «Григорьевский» за период с 05 апреля по 10 октября 2017 г.

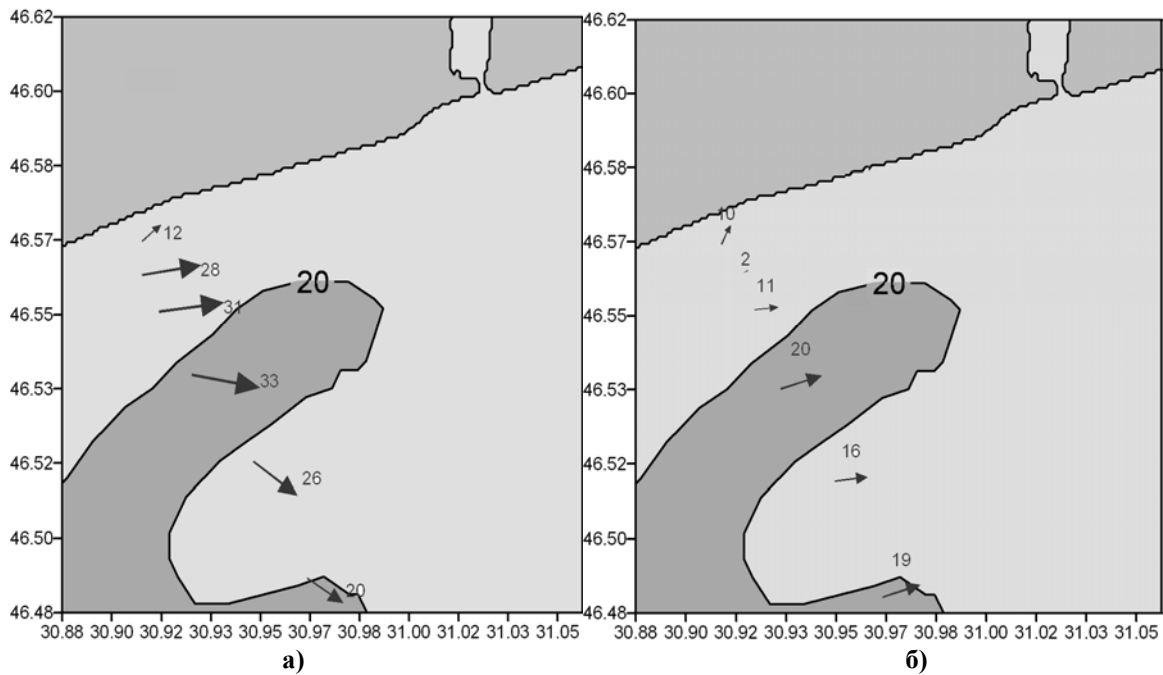


Рис. 3 – Распределение векторов течений, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, на горизонтах: а) 2 м; б) 5 м. Разрез №3 полигона «Григорьевский». 16 июня 2017

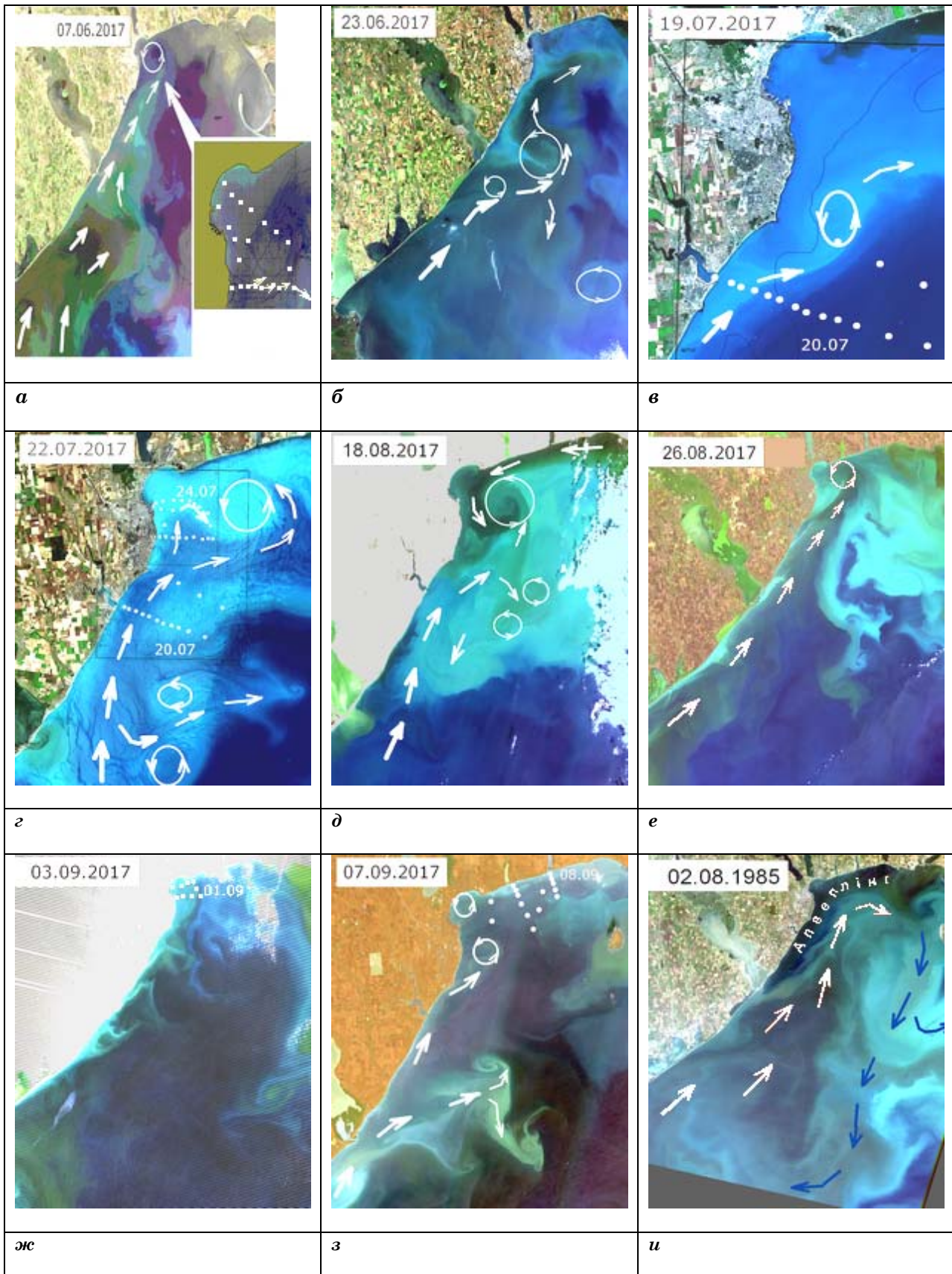


Рис. 4 – Картины глубокого северного распространения Дунайских вод в течение летнего периода 2017 г. и 1985 г. Экспертные вектора течений наложены на визуальные снимки высокого разрешения спутников Landsat-5,7,8 и Sentinel-2

с аналогичными или близкими ветровыми условиями. Полной аналогии с текущим годом по длительности однонаправленных ветровых условий найти не удалось, но выявлены годы с почти месячными периодами устойчивых СЗ ветров. Это август 1985 и 2011 гг., июнь 2000 и 2015 гг. Произведен поиск снимков высокого разрешения за аналогичные месячные периоды в архивах европейских и американских космических агентств, где есть в наличии многолетние архивы этих снимков. На рис. 4и представлен один из таких снимков, полученный 02 августа 1985 г., на котором хорошо выражена зона интенсивного северного переноса речных вод. В 1985 г. хорошо проявилось усиление упорядоченного переноса вод вдоль внешней границы зоны апвеллинга и антициклонический характер крупномасштабной циркуляции на СЗШ в целом.

Вихревую структуру в районе Одесского залива удалось инструментально зафиксировать при выполнении полигона «Одесский» 08 июня (рис. 4а, вставка). Приповерхностные скорости течения на южной периферии вихря имели восточную направленность, что соответствовало визуальной картине вихря, а скорости составляли $0.12-0.18 \text{ м с}^{-1}$.

За данными океанографических работ на полигоне «Одесский» в июне 2018 г. были зафиксированы орбитальные скорости на периферии одесского вихря более 30 см с^{-1} .

Средние пространственные размеры вихря по многочисленным спутниковым изображениям и данным полевых наблюдений достигали в диаметре 7-8 миль.

Верхняя граница сезонного термоклина в этот раннелетний период года была расположена на глубине 3-5 метров. Уже на глубине 5 м направленность течений была обратной, т.е. вихревая структура существовала только в пределах тонкого верхнего квазиоднородного слоя.

Представлялся сомнительным факт возможности вдольберегового выноса вод дунайской разгрузки в северные районы СЗШ. Однако рассмотренный случай и последующие, за период до первой декады сентября включительно (рис. 4 б-з), указывают на то, что глубокое распространение на север вод дунайского происхождения осуществлялось практически в течение всего летнего периода.

Как уже отмечалось, активные процессы прибрежного апвеллинга в июне-августе 2017 года, идентифицированные как по спутниковым данным, так и по натурным наблюдениям на

малом гидрографическом судне «Капитан Башев», привели к развитию интенсивного северного переноса вод вдоль западного побережья. Справа от потока вод дунайской разгрузки, почти без внедрения, в том же направлении распространялись воды с южной периферии шельфа, насыщенные фитопланктоном группы кокколитофорид. Бирюзовый, существенно более светлый, чем обычно, оттенок морских вод был длительное время заметен в районе п. Одесса при выполнении судовых океанографических наблюдений. Наиболее яркая фаза этого процесса показана на спутниковых изображениях от 26 июля 2017 г. (рис. 5).

В дальнейшем, в июле-августе, струя вод насыщенных кокколитофоридами распространялась вдоль п-ова Тендра в район Каркинитского залива и на юг – в область развития Севастопольских вихрей. Данный вид водорослей еще раз наглядно подтвердил свои замечательные свойства пассивного трассера при исследовании циркуляционного режима морских вод. Результаты визуального мониторинга за перемещением аномально цветущих вод подтвердили предположения о частой смене в летний период года крупномасштабного и традиционно циклонического переноса вод СЗШ на антициклоническое. Предположения эти были сделаны ранее для летнего полугодия по результатам модельных [8] и геострофических [9] расчетов по климатическим данным.

Цветение кокколитофорид на СЗШ продолжалось до середины первой декады сентября, в то время как в открытом море активная фаза завершилась к середине августа. Полный период цветения данного вида водорослей на СЗШ составил около 120 суток, а в северных районах шельфа отмечался впервые за все годы спутниковых наблюдений.

Следует отметить и факт возможного влияния изменения цвета воды (на более светлый) на радиационный баланс водной поверхности. Очень вероятно, что отражательная способность вод, насыщенных данным видом водорослей, несколько повышается, а, следовательно, меньше тепловой энергии проникает вглубь моря. Поскольку в настоящее время мы имеем материалы многочисленных океанографических наблюдений только одного года, то нет возможности провести сравнительный анализ с другими, более типичными ситуациями.

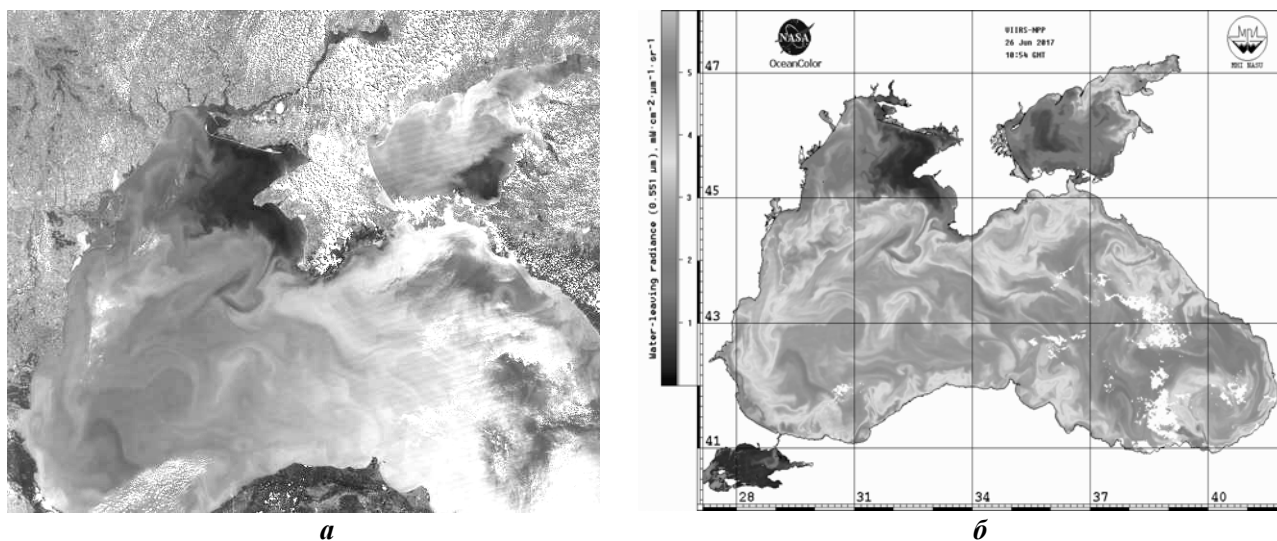


Рис. 5 – Цветение фитопланктона группы кокколитофорид в Черном море по данным космических снимков 26 июля 2017 г.: а) оптического диапазона (AERONET, спутник Aqua) и б) излучения водной поверхности - 551 нм (спутник SNPP)

4. ВЫВОДЫ

Многочисленные океанографические исследования, проведенные ФДУ «Одесский район Госгидрографии» в 2017 г. позволили существенно восполнить банк океанографических данных Черного моря, особенно его мелководного северо-западного шельфа в современных климатических условиях. Получили объяснение важные механизмы перераспределения водных масс в шельфовой области под действием явления апвеллинга.

В летний период 2017 г. отмечен самый длительный за последние 30 лет период развития сгонных явлений на западном и северном побережье СЗШ. Сопутствующие явления апвеллинга дали импульс к сезонному переносу вод дунай-днестровского междуречья в северные области шельфа и подтвердили ранее высказанные предположения об изменении сезонного характера циркуляции с циклонического (зимой) на антициклоническое (летом).

Полевые наблюдения и анализ спутниковых данных 2017 г. выявили аномалию в протекании редкого явления – активного перераспределения фитопланктона группы кокколитофорид по акватории северо-западного шельфа. Аномальное развитие летнего циркуляционного режима позволило впервые отметить перенос и, возможно, продолжение продуцирования водорослей в северных районах СЗШ, а также выявить его пространственную трансформацию и продолжительность развития процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симонова А. И. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV : Черное море. Вып. 1 : Гидрометеорологические условия С.-Пб.: Гидрометеоиздат, 1991. 430 с.
2. Иванов В. А., Ильин Ю. П. Атмосферные и гидрологические условия, способствующие распространению речных вод в северо-западной части Черного моря. *Комплексные экологические исследования Черного моря*. Севастополь: МГИ НАН Украины, 1995. С. 68-81.
3. Ильин Ю. П. Гидрологический режим распространения речных вод в северо-западной части Черного моря. *Наукові праці УкрНДГМИ*. 2006. Вып. 25. С. 242-251.
4. Попов Ю. И. Распространение шельфовых вод в северо-западной части Черного моря и их обмен с водами открытого моря. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2010. Вып. 26. С. 117-126.
5. Copernicus Open Access Hub. URL: <https://scihub.copernicus.eu/> (Accessed: 27.12.2018)
6. USGS. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (Accessed: 27.12.2018)
7. Морской портал МГИ: <http://dvs.net.ru/mp/index.shtml> (Accessed: 27.12.2018)
8. Иванов В. А., Рябцев Ю. Н. Анализ течений на северо-западном шельфе Черного моря. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2002. Вып. 1. С. 8-21
9. Срофеев Г. П., Попов Ю. И. Аналіз кліматичних геострофічних течій та їх витрат на зональному та меридіональному розрізах в районі материкового схилу північно-західної частини Чорного моря. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2012. Вып. 11. С. 250-258.

REFERENCES

1. Simonova, A.I. (1991). *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morey SSSR [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR]*. Vol. IV: *Chernoe more [The Black Sea]*. Issue 1: *Gidrometeorologicheskie usloviya [Hydrometeorological conditions]*. St.-Pb.: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
2. Ivanov, V.A. & Ilyin Yu.P. (1995). Atmosfernye i gidrologicheskie usloviya, sposobstvuyushchie rasprostraneniye rechnykh vod v severo-zapadnoi chasti Chernogo morya [Atmospheric and hydrological conditions conducive to the spread of river water in the northwestern part of the Black Sea]. *Kompleksnoe isledovaniye Chernogo moray [Comprehensive environmental studies of the Black Sea]*. Sevastopol: MHI of NASU, pp. 68-81. (in Russ.)
3. Ilyin, Yu.P. (2006). [Hydrological regime of distribution of river waters in the north-western part of the Black Sea] *Nauk. pratsi UkrNDHMI [Scientific works of the UkrSRHMI]*, 255, pp. 242-251. (In Ukr.)
4. Popov, Yu.I. (2010). [The distribution of shelf waters in the northwestern part of the Black Sea and their exchange with the waters of the open sea]. *Ecologicheskaya bezopasnost pribregnoy i shelfovoy zon i kompleksnoe ispolzovanie resursov shelfa. [Ecological safety of the coastal and shelf zones and the integrated use of shelf resources]*. Sevastopol: MGI, 26, pp. 117-126. (in Russ.)
5. Copernicus Open Access Hub. Available at: <https://scihub.copernicus.eu/> (Accessed: 27.12.2018)
6. USGS. Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov> (Accessed: 27.12.2018)
7. Morskoy portal MHI: <http://dvs.net.ru/mp/index.shtml> (Accessed: 27.12.2018)
8. Ivanov, V.A. & Ryabtsev, Yu.N. (2002). [Analysis of currents on the north-western shelf of the Black Sea]. *Ecologicheskay bezopasnost pribregnoy i shelfovoy zon i kompleksnoe ispolzovanie resursov shelfa [Ecological safety of coastal and shelf areas and complex resources for the shelf]*, 1, pp. 8-21.
9. Erofeev, G.P. & Popov, Yu.I. (2012). [Analysis of climatic geostrophic currents and their costs on zonal and meridional sections in the continental slope of the northwestern part of the Black Sea]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 11, pp. 250-258.

АПВЕЛІНГИ ТА ЦИРКУЛЯЦІЯ ВОД ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО ШЕЛЬФУ ЧОРНОГО МОРЯ У ЛІТНІЙ ПЕРІОД 2017 РОКУ

Ю. І. Попов, А. В. Матвєєв

Філіал державної установи «Держгідрографія» - «Одеський район Держгідрографії»,
пр. Маякний, 5, 65038, Одеса, Україна, ocean@hydro.od.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3549-3410>

На підставі матеріалів супутникових і натурних атмосферних та морських спостережень розглянуті циркуляційні процеси в водах північно-західного шельфу (ПнЗШ) Чорного моря в літній період 2017 року. Відзначається висока стійкість літніх відгінних вітрів північного і північно-північно-західного напрямків і 12 випадків прибережних апвелінгів. Три випадки апвелінгу вдалося інструментально зафіксувати на поперечних до берега океанографічних розрізах при виконанні сезонних полігонних робіт океанографічним підрозділом філії державної установи (ФДУ) «Одеський район Держгідрографії» (ДУ «Держгідрографія»). Збільшення густини прибережних вод призвело до аномально активного переносу вздовж узбережжя вод Дунай-Дністровського межиріччя в самі північні райони північно-західного шельфу. У 2017 році візуально проявився антициклонічний характер літньої циркуляції вод північно-західного шельфу. Отримані дані підтверджують часті випадки зміни в літні періоди року традиційної циклонічної циркуляції вод на антициклонічну.

Аномальний розвиток літнього циркуляційного режиму дозволив вперше відзначити перенесення фітопланктону групи кокколитофорід з відкритого моря в північні райони ПнЗШ, а також виявити його внутрішньо сезону просторову трансформацію і тривалість розвитку процесу.

В мористій частині Одеської затоки виявлено часто повторюване вихрове утворення циклонічної завихореності з просторовими розмірами до 7-8 миль і з орбітальними швидкостями, згідно з представленими даними, $0.12-0.18 \text{ мс}^{-1}$, а за даними останніх польових робіт - понад 0.30 мс^{-1} .

Значну допомогу в аналізі розглянутих ситуацій щодо перенесення і завихореності морської води відіграли візуальні зображення високого розділення, отримані з супутників Sentinel-2 і Landsat-5,7,8 з просторовою роздільною здатністю 10 і 30 метрів відповідно, а також аналогічні сателіти передніх модифікацій.

Ключові слова: Північно-західний шельф Чорного моря, трасер, цвітіння кокколитофорид, апвелінг, геострофічні течії, супутники Sentinel-2 і Landsat-5,7,8.

UPWELLINGS AND WATER CIRCULATION OF THE NORTH-WESTERN SHELF OF THE BLACK SEA IN THE SUMMER OF 2017

Yu. I. Popov, A. V. Matveev

*Odessa Area Branch of State Hydrographic Service of Ukraine,
5 Mayachny Lane, 65038, Odessa, Ukraine, ocean@hydro.od.ua*

On the basis of satellite and field atmospheric and marine observations, the water circulation processes of the north-western shelf (the NWS) of the Black Sea in the summer of 2017 were studied. The study indicated high stability of summer offshore winds of northern and north-northwest directions and 12 cases of coastal upwelling. Three cases of upwelling were instrumentally detected on the across-the-shore oceanographic sections during seasonal field works performed by the oceanographic unit of the branch "Odesa Area of State Hydrographic Service" of the state institution "State Hydrographic Service of Ukraine (SHSU)". The increase of coastal water density led to an abnormally active transfer along the coast of the Danube-Dniester interfluvial area to the northernmost parts of the NWS. In 2017 a visual manifestation of anticyclonic character of summer circulation of the NWS's water could be observed. The obtained data confirm the previous conclusions on frequent cases of change in summer periods of traditional cyclonic water circulation to the anticyclonic one.

The abnormal development of the summer circulation regime allowed us to record for the first time the transfer of coccolithophores phytoplankton from the open sea to the northern regions of the NWS and to reveal its intraseasonal spatial transformation and development process duration.

In the seaward part of the Gulf of Odessa a frequently repeated vortex formation of cyclonic vorticity with spatial dimensions of up to 7-8 miles and orbital velocities, according to the presented data, of $0.12\text{--}0.18\text{ m c}^{-1}$, and according to the latest field work, of over 0.30 m c^{-1} , was found.

When analyzing the considered situations associated with transfer and vorticity of sea water a significant role was played by high-resolution visual images obtained from Sentinel-2 and Landsat-8 satellites having a spatial resolution of 10 and 30 meters respectively, as well as by similar satellites of earlier modifications.

Keywords: the north-western shelf of the Black Sea; tracer; coccolithophore bloom; upwelling; geostrophic currents; Sentinel-2 and Landsat-8 satellites.

*Подання до редакції : 29. 10. 2018
Надходження остаточної версії : 25. 04. 2019
Публікація статті : 28. 11. 2019*