ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ОПТИЧЕСКИМИ СПУТНИКОВЫМИ ДАННЫМИ ДЛЯ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ

П.Д. Ломакин^{1,2}

¹Морской гидрофизический институт РАН, РФ, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

²Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: p_lomakin@mail.ru

По материалам комплексных океанологических съемок и спутниковых снимков методами парной и множественной корреляции оценена теснота статистических связей между спутниковыми данными и полями концентрации растворенного органического вещества (РОВ) в Керченском проливе. Показано, что между полями оптических спутниковых данных и подспутниковыми полями характеристик концентрации растворенного органического вещества в исследуемом регионе не существует тесной корреляционной связи. Выявлены конкретные ситуации, когда поля рассматриваемых величин связаны между собой слабой корреляционной зависимостью. Наиболее тесной оказалась искомая связь между яркостью третьего канала спутникового сканера MODIS и полем концентрации растворенной органики на поверхности исследуемой акватории.

Ключевые слова: растворенное органическое вещество, спутниковые данные, корреляция, Керченский пролив.

Поступила в редакцию: 20.02.2019. После доработки: 20.06.2019.

Введение. Растворенное органическое вещество относят к группе наиболее эффективных индикаторов загрязненных акваторий. Из-за сложности определения содержания этого вещества, массовые сведения о нем стали возможными относительно недавно. В последние годы данный параметр активно используются для оценки качества вод прибрежных океанских и морских акваторий [1, 2]. В частности исследование поля этого элемента водной среды, проведенное Морским гидрофизическим институтом за время с 2001 по 2014 годы в Керченском проливе [3], позволили обнаружить его основные антропогенные источники, связанные с функционированием портов, расположенных на берегу промышленных предприятий, с коллекторами сточных вод, грузовыми терминалами, площадками рейдовой перевалки, грунтовыми свалками. Также оценить степень загрязнения отдельных участков пролива. Выявить закономерности структуры природного и антропогенного полей концентрации этого вещества.

В предлагаемой статье рассмотрена возможность получения информации о поле концентрации растворенного органического вещества в Керченском проливе на основе спутниковых оптических данных. Подобные сведения представляются чрезвычайно полезными, например, в задачах оперативной оценки экологической ситуации, исследования гипоксии, последствий катастрофических явлений и др.

Рассчитана и проанализирована теснота статистических связей между оптическими спутниковыми данными и полями концентрации (фактической и интегральной) растворенного органического вещества в Керченском проливе.

В тексте статьи для обозначения содержания рассматриваемого элемента водной среды использована аббревиатура *DOM*, соответствующая стандартному термину «*Dissolve Organic Mater*», обычно употребляемому в литературе.

Исходные данные и методы исследования. В качестве исходных контактных данных использован массив концен-

трации *DOM*, полученный в экспедициях МГИ при помощи оптического зонда «Кондор» [4]. Концентрация этого вещества на каждой станции фиксировалась *in situ* с дискретностью по глубине 0.1 м.

Содержание интегральной растворенной органики в заданных слоях воды рассчитывалось для каждой станции путем суммирования средних соседних фактических значений *DOM* (шаг по глубине 0.1 м) между выбранными границами интересующего слоя.

Из массива контактных данных, включающего 31 съемку акватории Керченского пролива, которые были выпол-

нены с участием Морского гидрофизического института и автора этой статьи за время с 2001 по 2014 годы, удалось выбрать только две комплексные съемки, для которых из INTERNET подобраны спутниковые снимки с качеством, примерно, соответствующим рассматриваемой задаче (рис. 1).

Спутниковый снимок (рис. 1а) принят в день выполнения контактного эксперимента. Снимок на рис. 1б по причине облачной погоды, сопровождавшей данную съемку, подобран на ближайшую дату, через сутки после завершения экспедиции.

Рис. 1. Схема станций океанологических съемок Керченского пролива на спутниковых снимках 5 мая 2005 года (а) и 29 июля 2011 года (б)

Первая съемка реализована при свежем устойчивом северо-восточном ветре, когда в проливе установился генеральный перенос вод из Азовского моря, и преобладали мутные азовоморские воды. Вторая – в условиях слабого переноса вод из Черного моря, когда в пролив проникли прозрачные черноморские воды.

Для каждой из указанных ситуаций решались следующие задачи:

1. методом парной корреляции оценивалась теснота статистической связи Между подспутниковыми полями кон-

центрации *DOM* на отдельных горизонтах и показателем яркости спутникового снимка – плотностью фототона;

2. методом парной корреляции определялась теснота связи между подспутниковыми полями интегральной концентрации *DOM* в верхних слоях вод различной толщины и плотностью фототона спутникового снимка;

3. при помощи метода множественной корреляции [5] рассчитаны показатели статистической связи между подспутниковыми полями концентрации *DOM* и спектральной яркостью спутникового изображения по данным семи

каналов $L_1, L_2, \dots, L_7$ сканера MODIS, установленного на спутнике Landsat-5.

Соответствующее уравнение множественной корреляции имеет вид

$$DOM = b_{DOM0} + b_{DOM1}L_1 + b_{DOM2}L_2 + \dots + b_{DOM7}L_7$$

В качестве предикторов искомых зависимостей приняты ряды яркости, определенные в точках каждой станции по каждому из семи каналов спутникового сканера со следующими интервалами длин волн: канал 1 – 0.450–0.515 мкм; канал 2 – 0.525–0.605 мкм; канал 3 – 0.630–0.690 мкм; канал 4 – 0.750–0.900 мкм; канал 5 – 1.55–1.75 мкм; канал 6 – 10.4–12.5 мкм; канал 7 – 2.09–2.35 мкм.

Расчет характеристик искомых связей выполнен матричным методом. Коэффициенты уравнений множественной регрессии $b_0, b_1, b_2, \dots, b_7$ рассчитаны методом наименьших квадратов [5].

Теснота статистических связей оце-

нивалась согласно принятому в статистике критерию для коэффициента корреляции R [5]. Связь отсутствует при $|R| < 0.3$; слабая связь $0.3 < |R| < 0.7$; сильная корреляционная связь, рекомендуемая для расчетов, $0.7 < |R| < 1.0$.

Обсуждение результатов. Структура полей концентрации DOM в анализируемых ситуациях имеет качественно различные признаки.

В проникающих в пролив чистых водах Азовского моря вертикальная стратификация поля содержания DOM слабо выражена, тогда как в черноморских водах она отличается наличием подповерхностного максимума, наблюдаемого в слое скачка плотности (рис. 2).

Рис. 2. Примеры кривых вертикального распределения содержания DOM , мг/л для азовоморских (а) и черноморских (б) вод, взаимодействующих в Керченском проливе

Горизонтальная структура поля содержания DOM азовоморских вод более контрастна и сложна по сравнению с черноморскими водами, что связано с их относительно низким качеством. Она характеризуется присутствием неоднородностей в поле концентрации DOM (как природного, так и антропогенного происхождения) в виде линз с повышенным на общем фоне содержанием исследу-

емого вещества, линейный масштаб которых изменяется в интервале от нескольких сотен метров до нескольких миль. Горизонтальная структура поля DOM в черноморских водах отличается однородностью.

Первая поисковая задача, связанная с определением тесноты статистической связи между рассматриваемыми величинами, сводилась к расчету коэффициента

корреляции между полем яркости спутникового сигнала $B(x,y)$ и горизонтальными распределениями концентрации $DOM(x,y)$.

Последовательно, начиная с верхнего горизонта, рассчитывался ряд коэффициентов парной корреляции $R(z)$ для восьми следующих горизонтов: $z = 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5$ м. Здесь x,y – координаты станций; z – горизонт наблюдения DOM .

В результате оказалось, что для обеих ситуаций (рис. 1) между полем яркости снимка и полем содержания DOM на каждом горизонте искомая связь отсутствовала. Все рассчитанные коэффициенты корреляции располагались в интервале $0.13 < |R| < 0.31$. То есть, горизонтальные поля концентрации DOM , как на поверхности моря, так и в водной толще, не оказывали влияние на поле яркости спутникового изображения рассматриваемой акватории.

Таблица 1. Коэффициент корреляции между яркостью спутникового изображения и интегральным содержанием ΣDOM в верхнем слое (Δh) различной толщины при азовском (АП) и черноморском (ЧП) переносах вод

Δh , м	АП	ЧП
0.5	0.20	0.18
1.0	0.27	0.22
1.5	0.24	0.23
2.0	0.41	0.37
3.0	0.38	0.29
4.0	0.30	0.35
5.0	0.40	0.36

В данном случае искомая связь в верхнем слое вод толщиной от 0.5 до 1.5 м отсутствовала. Коэффициент корреляции здесь изменялся в пределах 0.18–0.27. Для более развитых по вертикали верхних водных слоев толщиной 2–5 м связь оказалась более тесной с коэффициентом 0.29–0.41. Согласно критерию [5], это означает, что между полем яркости спутникового сигнала $B(x,y)$ и горизонтальными распределениями интегральной концентрации $\Sigma DOM(x,y)$ в подповерхностном слое вод толщиной от 2 до 5 м существует слабая прямая статистическая связь, которую не рекомендовано в классической статистике

Следующее приближение решения данной задачи заключалось в поиске статистической связи между полем яркости спутникового сигнала $B(x,y)$ и горизонтальными распределениями интегральной концентрации

$\Sigma DOM(x,y)$ в семи последующих слоях толщиной $\Delta h = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0$ и 5.0 м. Данный вариант представляется физически более обоснованным по сравнению с предыдущим, так как поле яркости водной поверхности формирует не конкретный горизонт, а водный слой определенной толщины.

Зависимость коэффициента корреляции между анализируемыми величинами от толщины слоя (корреляционная функция) для ситуаций с азовским и черноморским генеральными переносами вод в Керченском проливе показана в табл. 1.

использовать для количественных оценок.

Рассмотрим статистические характеристики множественной корреляционной связи между полями содержания DOM и показаниями семи каналов спутникового сканера MODIS, используя рассчитанные корреляционные матрицы (табл. 2, 3).

Для анализируемых гидрологических ситуаций (рис. 1) статистические связи между полем концентрации DOM и показателями каналов спутникового сканера оказались подобными. Они характеризуются следующими особенностями (табл. 2, 3).

Таблица 2. Матрица парных коэффициентов корреляции ($R_{DOM/IL}$) множественной регрессионной связи между концентрацией поля DOM на поверхности Керченского пролива и показателями семи каналов спутникового сканера в условиях азовского переноса вод

-	DOM	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7
DOM	1	0.48	-0.30	0.57	0.15	0.19	0.36	0.21
L_1	0.48	1	0.24	0.09	-0.41	0.064	-0.33	<u>0.72</u>
L_2	-0.30	0.24	1	-0.30	-0.15	-0.19	<u>-0.84</u>	-0.21
L_3	0.57	0.09	-0.30	1	<u>0.57</u>	0.43	0.46	-0.16
L_4	0.15	-0.41	-0.15	<u>0.57</u>	1	<u>0.79</u>	0	-0.35
L_5	0.19	0.06	-0.19	0.43	<u>0.79</u>	1	0	0.23
L_6	0.36	-0.33	<u>-0.84</u>	0.46	0	0	1	0
L_7	0.21	<u>0.72</u>	-0.21	-0.16	-0.35	0.22	0	1

Таблица 3. Матрица парных коэффициентов корреляции ($R_{DOM/IL}$) множественной регрессионной связи между концентрацией поля DOM на поверхности Керченского пролива и показателями семи каналов спутникового сканера в условиях черноморского переноса вод

	DOM	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7
DOM	1	0.02	0.34	0.43	0.14	0.07	0.16	-0.13
L_1	0.02	1	0.04	-0.23	-0.39	0.02	<u>-0.57</u>	-0.15
L_2	0.34	0.04	1	0.37	0.07	-0.28	0.10	-0.17
L_3	0.43	-0.23	0.37	1	0.42	0.14	0.41	0.06
L_4	0.14	-0.39	0.07	0.42	1	<u>0.51</u>	0.27	0.05
L_5	0.06	0.02	-0.28	0.14	<u>0.51</u>	1	0.02	0.31
L_6	0.16	<u>-0.57</u>	0.10	0.41	0.27	0.02	1	0.12
L_7	-0.13	-0.15	-0.17	0.06	0.05	0.31	0.12	1

В обеих анализируемых ситуациях наиболее значимый предиктор искомой связи – информация третьего спутникового канала (диапазон длин волн 0.630-0.690 мкм). Соответствующий коэффициент корреляции, $R = 0.43$ для первой съемки и $R = 0.57$ – для второй, что указывает на наличие между этими величинами прямой слабой (согласно критерию $0.3 < |R| < 0.7$ [5]) корреляционной связи.

Вклад данных других каналов спутникового сканера незначителен. В большинстве случаев $|R| < 0.3$, что по критерию [5] ($0 < |R| < 0.3$) указывает на отсутствие корреляционной связи. Это

также подтверждается значимыми коэффициентами парной корреляции между рядами предикторов, $|R| = 0.51-0.79$ (табл. 2, 3).

Уравнение множественной регрессии $DOM = -0.1509 + 0.00457L_1 + 0.0131L_2 + 0.03021L_3 + 0.0048L_4 - 0.00449L_5 + 0.0076L_6 - 0.01015L_7$ с учетом значимости частных коэффициентов корреляции сводится к уравнению парной регрессии $DOM = -0.15 + 0.03L_3$.

В классической статистике для практических расчетов и прогностических задач рекомендуется использовать сильные корреляционные связи с коэффициентом $|R| > 0.7$ [5].

В океанологии и гидрометеорологии, как правило, статистические зависимости с коэффициентом $|R| \geq 0.5$ находят широкое практическое применение. Поэтому, выявленные и рассмотренные в настоящей статье статистические связи, характеризующиеся небольшим коэффициентом корреляции, на уровне $|R| \approx 0.5$, позволяют их использовать для набора информации о поле концентрации *DOM* в водах Керченского пролива по оптическим спутниковым данным. В частности, сведения о яркости водной поверхности, фиксируемые при помощи третьего канала спутникового сканера MODIS, через полученное в настоящей статье уравнение регрессии могут быть преобразованы в поля концентрации *DOM* на поверхности пролива.

Следует отметить, что выявленные корреляционные связи рассчитаны на эмпирическом материале, накопленном в рамках экспедиционных программ, не предполагавших применение методов спутниковой гидрофизики. Поэтому качество имеющейся исходной информации не вполне соответствует рассмотренным в настоящей статье вопросам, а полученный результат может быть улучшен при наличии эмпирических данных на основе специально организованных подспутниковых экспериментов. Для этого необходимо выполнение условий синхронности набора спутниковых и контактных подспутниковых данных, а также точности разрешения и информативности спутниковых снимков в видимом диапазоне, которая максимальна при безоблачном небе и прозрачной атмосфере.

Сроки проведения подобных экспериментов следует обязательно планировать с учетом прогноза соответствующих погодных условий. Также должны быть предусмотрены специальный подбор и программная коррекция современной спутниковой информации.

Заключение. По материалам подспутниковых контактных съемок и спутниковых снимков на основе методов парной и множественной корреляции рассчитана и оценена теснота статистических связей между оптическими характеристиками спутниковых изображений и данными полей содержания *DOM* в Керченском проливе.

В результате решения трех задач показано следующее:

1. отсутствие искомой связи между полем яркости спутникового снимка и горизонтальными полями содержания *DOM*;

2. отсутствие корреляционной зависимости между полем яркости спутникового снимка и полями интегральной концентрации ΣDOM в верхнем 1.5-метровом слое вод; наличие слабой статистической прямой связи между полем яркости спутникового снимка и полями интегральной концентрации ΣDOM с коэффициентом 0.29–0.41 в верхнем слое толщиной от 2 до 5 м;

3. наличие прямой корреляционной зависимости с коэффициентом 0.43–0.57 между полем яркости отраженного спутникового сигнала, которая фиксируется третьим каналом цветового сканера MODIS и полем концентрации *DOM* на поверхности Керченского пролива для вод азовского и черноморского происхождения.

Полученное в рамках последней задачи уравнение регрессии рекомендовано для практического использования.

Работа выполнена в рамках государственных заданий по темам № 0827-2014-0011 «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (Шифр «Оперативная океанография») и № 0827-2014-0010 «Комплекс-

ные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и гидротехнологий» (Шифр «Фундаментальная океанология»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Spatial and temporal variability of absorption by dissolved material at a continental shelf* / E. Boss, W.S. Pegau, J.R.V. Zaneveld [et al.] // J. Geophys. Res. 2001. 106, № C5. P. 9499–9507.
2. *Fluorescence properties of dissolved organic matter in coastal Mediterranean*

waters influenced by a municipal sewage effluent (Bay of Marseilles, France). / M. Tedetti, R. Longhitano, N. Garcia [et al.] // Environ. Chem. 2012, 9. P. 438–449.

3. Ломакин П.Д., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А. Поле растворенного органического вещества в Азовском море и Керченском проливе на базе оптических наблюдений. // Морской гидрофизический журнал. № 5, 2016. С. 76–88.

4. <http://ecodevice.com.ua/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> (дата обращения: 04.06.2019).

5. <https://math.semestr.ru/regress/corel.php>. (дата обращения: 04.06.2019).

EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF USING OF LINKS BETWEEN OPTICAL SATELLITE DATA FOR CONTENT ANALYSIS OF DISSOLVED ORGANIC SUBSTANCE IN THE KERCH STRAIT

P.D. Lomakin^{1,2}

¹Marine Hydrophysical Institute of RAS, RF, Sevastopol, Kapitanskaya St., 2

²Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

Based on the materials of complex oceanographic surveys and satellite images using the methods of pair and multiple correlation, the tightness of statistical relationships between satellite data and the concentration fields of dissolved organic matter in the Kerch Strait was estimated. It is shown that there is no close correlation between the fields of optical satellite data and the sub-satellite fields of the characteristics of dissolved organic matter concentration in the studied region. Specific situations have been revealed, when the fields of the considered quantities are interconnected by weak correlation dependence. The closest relationship was found between the brightness of the third channel of the MODIS satellite scanner and the field of dissolved organics concentration on the surface of the investigated area.

Keywords: dissolved organic matter, satellite data, correlation, the Kerch Strait.