

СТАТИСТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ МЕЖДУ СПУТНИКОВЫМИ ДАННЫМИ И ЭЛЕМЕНТАМИ ПОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ ОБЩЕГО ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ

П.Д. Ломакин

ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН»,
РФ, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2,
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 общего взвешенного вещества в Керченском проливе. Показано, что между полями оптических спутниковых данных и полями характеристик концентрации общего взвешенного вещества в исследуемом регионе не существует тесной корреляционной связи, которую можно использовать для количественных оценок концентрации взвеси на базе спутниковой информации. Выявлены конкретные ситуации, когда поля рассматриваемых величин связаны между собой слабой корреляционной зависимостью. Наиболее тесной оказалась корреляционная связь между яркостью спутникового изображения и полем интегральной взвеси в верхнем слое вод.

Ключевые слова: TSM, спутниковые данные, корреляция, Керченский пролив

Поступила в редакцию: 25.05.2018.

Введение. Взаимодействующие в Керченском проливе воды Черного и Азовского морей обладают различными гидрооптическими свойствами. Насыщенные взвесью азовоморские воды существенно отличаются от черноморских вод высокой мутностью, малой прозрачностью (~ в 3-4 раза меньше), особой цветностью. Эти признаки, описанные в рубрике «Обсуждение результатов», хорошо отражают спутниковые изображения акватории пролива в видимом диапазоне. Их использование позволяет на качественном уровне отслеживать элементы циркуляции вод и потоки взвеси, определять участки размыва берега и дна, а также области аккумуляции взвешенного вещества [1].

В предлагаемой статье предпринята попытка перейти к количественному уровню применения спутниковых данных, представляющему прикладной интерес в вопросах, связанных с информацией о поле взвешенного вещества в Керченском проливе. Например, задачи заносимости портовых акваторий, бухт, судоходных каналов, деформации береговой линии и дна.

Оценена теснота статистических связей между оптическими спутниковыми

данными и полями концентрации (фактической и интегральной) взвешенного вещества в Керченском проливе.

В тексте статьи для обозначения концентрации взвеси использована аббревиатура TSM, соответствующая стандартному термину «*Total Suspended Matter*», обычно употребляемому в литературе.

Материал и методика. В качестве исходных контактных данных использован массив концентрации TSM, полученный в экспедициях МГИ при помощи оптического зонда «Кондор» [2]. Концентрация этого вещества на каждой станции фиксировалась *in situ* с дискретностью по глубине 0,1 м.

Содержание интегральной взвеси в заданных слоях воды рассчитывалось для каждой станции путем суммирования средних соседних фактических значений TSM (шаг по глубине 0,1 м) между выбранными границами интересующего слоя.

Из массива контактных данных, включающего 31 съемку акватории Керченского пролива, которые были выполнены с участием Морского гидрофизического института за время с 2001 по 2014 гг., 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 экс-

перимента. Снимок на рис. 1б по причине облачной погоды, сопровождавшей данную съемку, подобран на ближайшую дату, через сутки после завершения экспедиции.

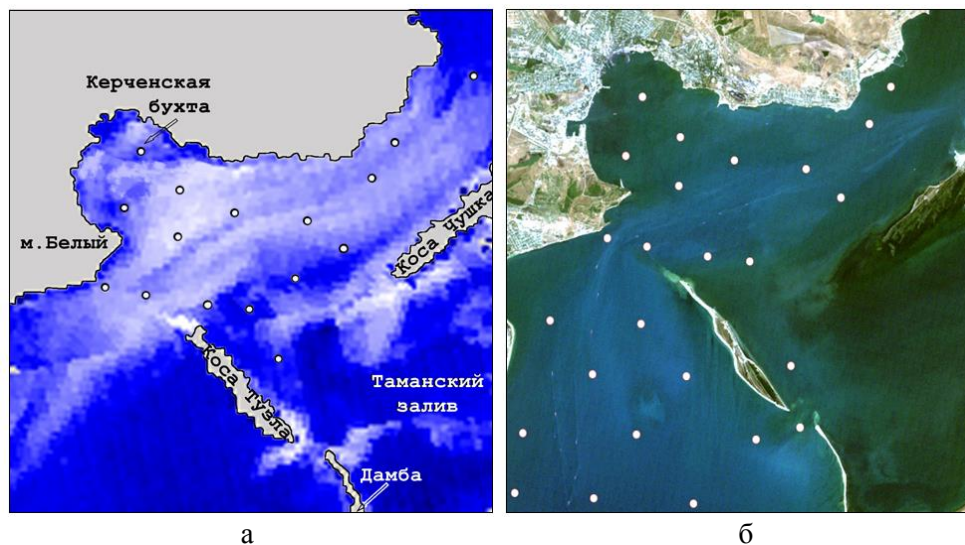


Рис. 1. Схема станций океанологических съемок Керченского пролива на спутниковых снимках 5 мая 2005 г. (а) и 29 июля 2011 г. (б)

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 концентрации TSM на отдельных горизонтах и показателем яркости спутникового снимка – плотностью фототона;

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

(3) при помощи метода множественной корреляции [3] рассчитаны показатели статистической связи между подспутниковыми полями концентрации TSM и спектральной яркостью спутни-

кового 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:

$$TSM = b_{TSM0} + b_{TSM1}L_1 + b_{TSM2}L_2 + \dots + b_{TSM7}L_7.$$

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 [3].

Теснота статистических связей оценивалась согласно принятому критерию для коэффициента корреляции R [3]. 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 TSM в анализируемых ситуациях имеет качественно различные признаки (рис. 2) [4]. При азовском переносе она более контрастна и сложна по сравнению с черноморским переносом вод и характеризуется наличием неоднородностей (как природного,

так и антропогенного происхождения) и отдельных линз с высокой концентрацией TSM, а также линз с крайне низким содержанием этого вещества (рис. 2а). В условиях преобладающего переноса вод из Черного моря в проливе наблюдаются однородные прозрачные воды с концентрацией TSM в разы и на порядок ниже. Максимум содержания взвеси в данной ситуации расположен в узком придонном слое (рис. 2б).

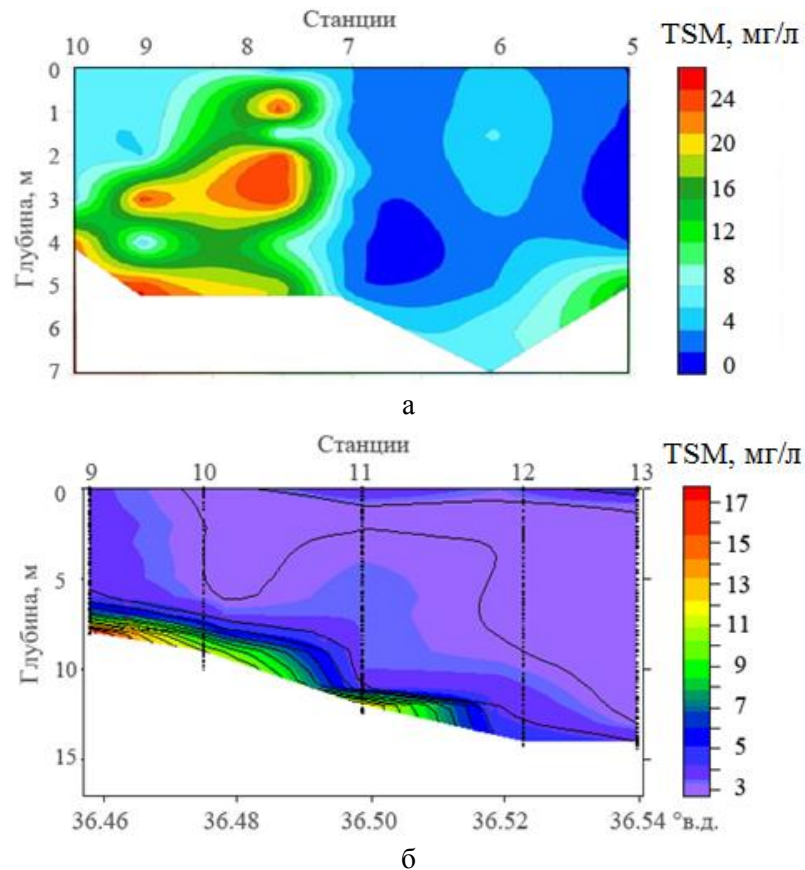


Рис. 2. Типичное вертикальное распределение содержания TSM, мг/л для азовоморских (а) и черноморских (б) вод на зональных разрезах через центральную часть Керченского пролива

Отмеченные характерные признаки отражены в ряде оптических свойств спутниковых изображений водной поверхности рассматриваемого региона.

Первая поисковая задача, связанная с определением тесноты статистической связи между рассматриваемыми величинами, сводилась к расчету коэффициента корреляции между полем яркости спутникового сигнала $V(x, y)$ и горизонтальными распределениями концентрации TSM(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 TSM.

В результате оказалось, что для обеих ситуаций (рис. 1) между полем яркости снимка и полем содержания TSM на каждом горизонте искомая связь отсутствовала. Все рассчитанные коэффициенты корреляции располагались в диапазоне $0,12 < |R| < 0,28$. То есть, горизонтальные поля концентрации TSM, как на поверхности моря, так и в водной толще, не влияют на поле яркости спутникового изображения рассматриваемой акватории.

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

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

$\Delta h, \text{ м}$	АП	ЧП
0,5	0,22	0,21
1,0	0,27	0,23
1,5	0,31	0,23
2,0	<u>0,55</u>	0,27
3,0	0,20	0,33
4,0	-	<u>0,52</u>
5,0	-	0,18

Видно, что в данном случае искомая связь более тесная по сравнению с предыдущим. Как для азовских, так и для черноморских вод наблюдалась тенденция роста коэффициента с увеличением толщины верхнего слоя. После достижения максимума на следующем шаге приращения толщины слоя вод корреляционная связь исчезала.

В ситуации азовского переноса слабая положительная корреляционная связь с коэффициентами 0,31 и 0,55 между полями яркости спутникового снимка и интегральной концентрации ΣTSM выявлена для слоев толщиной 1,5 и 2,0 м. При черноморском переносе вод аналогичная связь с коэффициентами

0,33 и 0,52 отмечена для слоев толщиной 3,0 и 4,0 м (табл. 1). То есть, распределение интегральной взвеси в верхних слоях толщиной 2 и 4 м – значимый фактор, определяющий поле яркости спутникового изображения поверхности воды в Керченском проливе соответственно в ситуациях азовоморского и черноморского глобальных переносов вод.

Уравнение регрессии для слоя 0–2 м в ситуации, когда в Керченском проливе преобладают азовоморские воды, имеет вид $\Sigma TSM = -0,10B + 6,51; R = 0,55$. В условиях черноморского переноса вид соответствующего уравнения для слоя 0–4 м $\Sigma TSM = -0,12B + 2,33; R = 0,52$.

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

Для гидрологической ситуации, определяемой азовским генеральным переносом вод через Керченский пролив (рис. 1а) наиболее тесная парная обратная корреляционная связь ($R = -0,44$) наблюдалась между полем TSM и полем яркости первого канала сканера. Слабая связь с коэффициентами $0,3 < |R| < 0,35$ обнаружена между полем TSM и полями яркости соответственно третьего, четвертого и седьмого каналов сканера MODIS. В случае отсутствия взаимной парной статистической связи между полями яркости этих каналов их можно было использовать в качестве дополнительных аргументов искомой множественной корреляционной зависимости.

Однако, оказалось, что поля яркости третьего и четвертого каналов связаны между собой ($R = 0,51$). Между полями яркости четвертого и первого каналов существует тесная корреляционная связь с коэффициентом $R = 0,72$, а показания седьмого канала коррелирует с показаниями пятого ($R = 0,57$). Информация второго, пятого и шестого каналов сканера не связана с подспутниковым полем TSM, так как соответствующие парные коэффициенты корреляции незначительны (табл. 2).

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

-	TSM	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇
TSM	1	-0,44	0,08	-0,32	-0,33	0,17	-0,13	0,34
L ₁	-0,44	1	0,37	-0,35	<u>-0,72</u>	-0,21	<u>-0,64</u>	0,02
L ₂	0,08	0,37	1	-0,28	-0,26	-0,39	-0,46	-0,46
L ₃	-0,32	-0,35	-0,28	1	<u>0,51</u>	0,24	0,43	0,01
L ₄	-0,33	<u>-0,72</u>	-0,26	<u>0,51</u>	1	<u>0,54</u>	<u>0,51</u>	0,01
L ₅	0,17	-0,21	-0,39	0,24	<u>0,54</u>	1	-0,12	<u>0,57</u>
L ₆	-0,13	<u>-0,64</u>	-0,46	0,43	<u>0,51</u>	-0,12	1	0,06
L ₇	0,34	0,03	-0,46	0,01	0,02	<u>0,57</u>	0,06	1

Для гидрологической ситуации азовского переноса вод через Керченский пролив (рис. 1а) выявлена слабая обратная корреляционная зависимость с коэффициентом $R = -0,44$ между полем концентрации TSM и полем яркости первого канала спутникового сканера MODIS. Вклад остальных каналов незначителен.

Примерно такой же значимости корреляционная связь с коэффициентом

$R = -0,49$ между полем яркости первого канала и подспутниковыми данными обнаружена и в ситуации черноморского глобального переноса вод через пролив (рис. 1б).

Парная корреляция между показателями яркости других каналов и полем концентрации TSM в данной ситуации не наблюдалась, соответствующие коэффициенты были низкими, $|R| < 0,3$ (табл. 3).

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

-	TSM	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇
TSM	1	-0,49	0,20	0,24	0,01	-0,28	0,09	0,13
L ₁	-0,49	1	0,04	-0,23	-0,39	0,02	<u>-0,57</u>	-0,16
L ₂	0,20	0,04	1	0,37	0,07	-0,28	0,10	-0,17
L ₃	0,24	-0,23	0,37	1	0,42	0,14	0,41	0,06
L ₄	0,01	-0,39	0,07	0,42	1	<u>0,51</u>	0,27	0,05
L ₅	-0,27	0,02	-0,28	0,14	<u>0,51</u>	1	0,02	0,31
L ₆	0,09	<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

Уравнения множественной регрессии после оценки значимости частных коэффициентов свелись к уравнениям парной регрессии: $TSM = 89,15 - 0,12 L_1$, $R = -0,44$ для азовского переноса и $TSM = 30,95 - 0,11 L_1$, $R = -0,49$ – в условиях черноморского.

Для практических расчетов и прогностических задач рекомендуется использовать сильные корреляционные связи с коэффициентом $|R| > 0,7$ [3]. Поэтому, обнаруженные и проанализиро-

ванные выше слабые статистические связи, теснота которых, характеризуется максимальным коэффициентом корреляции $|R| = 0,44-0,55$, не позволяют (согласно [3]) применять рассмотренные спутниковые данные для определения структурных элементов полей содержания TSM в водах Керченского пролива на количественном уровне.

В океанологии и гидрометеорологии, как правило, статистические зависимости с коэффициентом $|R| \geq 0,5$ находят

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 дополнительной информации о поле концентрации TSM к получаемой при визуальном анализе спутниковых снимков акватории Керченского пролива. В частности, при помощи этих связей могут быть рассчитаны средние и средние взвешенные концентрации взвеси, уточнены экстремумы горизонтального распределения, выявлены источники и пути распространения взвешенного вещества.

Наиболее удачным представляется результат, связанный с возможностью расчета интегральной взвеси в верхнем слое вод пролива толщиной 2–4 м на базе дистанционных методов. Дальнейшее развитие подобных задач может быть весьма перспективным.

Следует отметить, что выявленные корреляционные связи рассчитаны на эмпирическом материале, полученном 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. Должны быть предусмотрены специальный подбор и программная коррекция современной спутниковой информации.

Вместе с тем, даже при хорошо организованном и проведенном подспутниковом эксперименте и качестве подобранного спутникового снимка ожидать

наличие сильной искомой корреляционной связи в исследуемом регионе вряд ли возможно.

Это обусловлено рядом следующих факторов. По сравнению с другими прибрежными районами Крыма и открытыми водами Черного и Азовского морей Керченский пролив отличается развитой системой течений, активной динамикой, сложной структурой и значительной временной изменчивостью поля взвешенного вещества. На небольших его относительно изолированных друг от друга акваториях (бухты, узкости, заливы) находятся мощные природные и антропогенные источники TSM, один из которых – судоходство [4].

Через пролив ежедневно проходят до сотни судов различного назначения и тоннажа, в том числе и океанские водоизмещением 30–80 тыс. тонн. Основной судоходный и подходные к портам каналы проектировались из расчета на суда типа «река – море» с водоизмещением 3–5 тыс. тонн. Движущиеся суда винтами разрушают кромки, стенки и дно каналов. При этом в водную толщу поступает огромное количество TSM.

Согласно имеющимся измерениям, концентрация взвеси в отобранных из кильватерного следа пробах воды достигает 100–300 мг/л. Это взвешенное вещество антропогенной природы разносится на значительные расстояния, искажая результат подспутникового эксперимента.

Одна из главных причин, не позволяющих рассчитывать на обнаружение и оценку значимости тесной статистической связи (даже если она существует) между дистанционными и контактными данными, обусловлена отсутствием их общей временной привязки в условиях существенной временной изменчивости поля концентрации TSM.

Спутниковый снимок фиксирует ситуацию, соответствующую определенному моменту времени, тогда как контактная съемка исследуемой акватории в лучшем случае выполняется в течение светлого времени суток, а зачастую и двух.

Заключение. По материалам подспутниковых контактных съемок и спутниковых снимков на основе методов парной и множественной корреляции

оценена теснота статистических связей между оптическими характеристиками спутниковых изображений и данными полей содержания TSM в Керченском проливе.

В результате решения трех задач показано следующее:

(1) отсутствие искомой связи между полем яркости спутникового снимка и горизонтальными полями содержания TSM;

(2) наличие слабой прямой корреляционной зависимости с коэффициентом 0,55 и 0,52 между полем яркости спутникового снимка и полями интегральной концентрации TSM, соответственно, в слое 0–2 м в азовских водах пролива и 0–4 м – в черноморских;

(3) наличие слабой обратной корреляционной зависимости с коэффициентом -0,44 и -0,49 между полем яркости отраженного спутникового сигнала, которая фиксируется первым каналом цветового сканера MODIS в диапазоне длин волн 0,450–0,515 мкм и полем концентрации TSM на поверхности для вод азовского и черноморского происхождения.

Обоснована перспектива развития задачи (2).

Показано, что одна из главных причин, не позволяющих рассчитывать на обнаружение тесной статистической связи между дистанционными и контактными сведениями, касающимися рассмотренных величин, обусловлена отсутствием их общей временной привязки в условиях характерной для Керченского

пролива существенной временной изменчивости поля концентрации TSM.

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0827-2018-0002 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (шифр «Оперативная океанология») и № 0827-2018-0003 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования» (шифр «Океанологические процессы»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломакин П.Д., Боровская Р.В. Характеристика современного состояния системы течений в Керченском проливе на базе спутниковых и контактных наблюдений // Исследования Земли из Космоса. 2006. № 6. С. 65–71.

2. <http://www.ecodevice.narod.ru/turbidimeter/turbidimeter.htm> (дата обращения: 18.05.2018).

3. <https://math.semestr.ru/regress/core1.php> (дата обращения: 18.05.2018).

4. Ломакин П.Д., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А. Поле концентрации общего взвешенного вещества в Керченском проливе на базе оптических наблюдений // МГФЖ. 2017. Вып. 6. С. 65–77.

STATISTICAL CORRELATION BETWEEN SATELLITE DATA AND ELEMENTS OF TOTAL SUSPENDED MATTER FIELD IN THE KERCH STRAIT

P.D. Lomakin

Marine Hydrophysical Institute of RAS,
Russian Federation, Sevastopol, Kapitanskaya St., 2

Based on data of complex oceanographic surveys and satellite imagery using methods of pair and multiple correlation, the tightness of statistical relationships between satellite data and total suspended matter concentration field in the Kerch Strait is estimated. It is shown, that there is no close correlation between the optical satellite data fields and fields of total suspended matter concentration characteristics in the studied region, which can be used for quantitative estimates of the suspension concentration based on satellite information. Specific situations are identified where the fields of the quantities under consideration are related to each other by weak correlation dependence. The correlation between the brightness of the satellite image and the field of the integral suspension in the upper water layer turned out to be the closest.

Keywords: TSM, satellite data, correlation, the Kerch Strait