

УДК 581.132.1:551.46.08

© А.Д. Федоровский, чл.-корр. НАН Украины, д-р физ.-мат. наук, заведующий отделом;

А.Ю. Порухевич;

А.А. Чепыженко;

В.Г. Якимчук, д-р техн. наук, главный научный сотрудник

Научный центр аэрокосмических исследований Земли

Института геологических наук НАН Украины, г. Киев

РЕГИОНАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ НА ПРИМЕРЕ КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА

Целью исследования является определение возможности оценивания характеристик водной среды с помощью дистанционного сканирования морской поверхности при помощи современных космических методов и средств. В рамках исследования для Керченского пролива были использованы синхронные контактные измерения на 26 станциях: температуры (T), солености (S), суммарного взвешенного вещества (TSM), растворенного органического вещества (DOM), а также данные спектральной яркости 7 каналов спутника Landsat-5. На основании этих данных методом наименьших квадратов была построена многомерная линейная регрессионная модель зависимости характеристик T , S , TSM , DOM от влияющих факторных переменных - спектральной яркости 7 каналов Landsat-5. Вычисленные по линейной регрессионной модели характеристики водной среды имеют погрешности от 2% до 12%, что свидетельствует о реальной возможности использовать космические системы для контроля состояния морских экосистем.

Ключевые слова: морские акватории, космические снимки, регрессионные модели, дистанционное сканирование водной поверхности

Керченский пролив объединяет водные бассейны Азовского и Черного морей, имеющих не только свой особый гидрологический режим, но и водные массы, которые зачастую на 1-2 порядка отличаются по концентрациям содержащихся в них веществ. В результате природных факторов, обусловленных водообменом морей при различной ветровой ситуации и, соответственно, переносом присущих им природных концентраций веществ, происходит сложная трансформация привнесенных концентраций веществ и образовавшихся в самом Керченском проливе в результате дампинга, дноуглубительных работ, многочисленных береговых стоков, абразии берегов и кос (Чушка и Тузла). Интенсивное использование акватории пролива в качестве мест перевалки грузов, дампинга грунтов и как транспортного коридора

дора для судов (фарватер) приводит к поступлению в пролив загрязнений, как в результате стоков, так и в результате взмучивания донных осадков винтами проходящих судов.

Следовательно, формируется сложная и временно неустойчивая пространственная и вертикальная структура переноса водных масс, имеющих различные концентрации природных и загрязняющих веществ и определяющих гидрооптическую структуру вод исследуемой акватории. В результате интенсивных седиментационных и абразионно - аккумуляционных процессов и трансформации азово-морских вод, даже при малых глубинах центральной части пролива (до 4-5 метров), формируется сложная вертикальная структура переноса взвешенного вещества получение объективной информации о которой определяет достоверность оценки формирования и переноса взвешенных наносов и антропогенной нагрузки на водную экосистему, влияющих как на литодинамические, так и на продукционные процессы в Керченском проливе.

Наряду с этим, Керченский пролив, Азовоморское и Черноморское предпроливье – это исключительно продуктивные районы, являясь как местом развития ихтио- и макрзоопланктона - служащих одним из основных критериев оценки эффективности популяции, характеризующих динамику численности отдельных поколений рыб, так и путем ежегодной миграции (до 100 тыс. т.) рыбы, в целом играют определяющую роль в формировании запасов рыб в Азово-Черноморском бассейне.

В настоящее время эта акватория подвергается нарастающему антропогенному воздействию, интенсификации седиментационных и абразионно-аккумуляционных процессов, приводящих к потере нерестовых угодий и к катастрофическому падению численности промысловых гидробионтов, но в то же время остаётся наименее изученной. Регулярные экосистемные исследования в этом районе и возможности получения воспроизводимых результатов позволяют находить не только закономерности влияния экологических факторов среды на биологические объекты, но и дать количественную оценку этого влияния. Без этих данных невозможно изучение биологических процессов, проходящих в этом регионе.

Сбор информации о концентрации взвешенных веществ в прибрежных и проливных водах, имеющий важное значение для надлежащего управления прибрежной средой традиционными методами и инструментальными средствами, помимо их трудоемкости и высокой затратности, не позволяет адекватно описать процессы трансформации водных масс и потока взвешенных наносов в условиях высокоизменчивой трансформации воздушных масс в районе Керченского пролива. Однако инструментальные методы, при их достоинствах, обеспечивают точную оценку концентрации общего взвешенного вещества только на момент проведения исследований. Для этого региона характерным является неустойчивость метеорологических полей - изменение направления ветра (на 90-120°) и скорости (до 5-7 м/сек), что вызывает перестройку всей системы трансформации как системы течения и интенсификации системы локальных струйных и разрывных течений, которые, в свою очередь, интенсифицируют формирование и трансформацию взвешенных наносов и седиментационно-абразионные процессы.

В настоящей работе рассматриваются возможности применения современных космических методов и средств для мониторинга прибрежных акваторий, а именно, путем анализа синхронных измерений морских акваторий со спутника и контактными методами.

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), обеспечивая одномоментную съемку больших акваторий с учетом сложившейся синоптической ситуации, является эффективным методом для подобных исследований. При этом важным этапом оценки состояния отдельных звеньев водной экосистемы на основе обработки данных ДЗЗ (в том числе определение концентрации общего взвешенного и растворенного органического вещества) является как совершенствование алгоритма расчета их концентрации, на основе данных цветовых сканеров, так и их валидации и, в конечном счете, обеспечение адекватного описания процессов.

За последнее время достигнуты значительные успехи в области развития аэрокосмических методов и технологий дистанционного зондирования океана. Перспективность их использования для решения задач мониторинга акваторий, в том числе прибрежных, основана на возможности регистрации современной дистанционной аппаратурой широкого спектра значимых параметров водной среды. К ним относятся, прежде всего, вариации гидрооптических характеристик, в первую очередь цвета и мутности, за счет флуктуаций коэффициентов рассеяния и поглощения света при изменениях концентрации взвешенных и поглощающих веществ [1].

Эффективность методов ДЗЗ при определении концентрации взвешенных веществ зависит от того, насколько вариации общего взвешенного вещества (ОВВ) проявляются в изменении оптических свойств водной среды. Применение метода ДЗЗ при оценке ОВВ было одним из первых гидрологических применений [2]. При этом концентрация ОВВ оценивается непосредственно по результатам измерения *in-situ*. Методы оценки концентрации взвешенных наносов на основе данных ДЗЗ основаны на эмпирических соотношениях между *in-situ* качества воды и данных коэффициента отражения дистанционного зондирования. Эти отношения, как правило, описываются в виде линейной и экспоненциальной регрессии [3]. Устойчивая положительная связь, которая существует между ОВВ и регистрируемым методами ДЗЗ спектральным излучением L , сильно зависит от влияния атмосферы, а также от концентрации и дисперсного состава взвешенного материала и глубины. При этом данные об концентрации ОВВ оцениваются или по относительной прозрачности водной среды (глубине видимости диска Секки) или среднее значение концентрации ОВВ по данным турбидиметра в слое глубины видимости диска. Зачастую исследования включают подробный анализ оптических *in-situ* данных (обратное рассеяния - C_{bb} и спектральный коэффициент отражения - R_{rs}). Для устьевых районов, с типичной монотонной стратификацией ОВВ по мере удаления от устья в результате седиментации и высокими концентрациями ОВВ (до 100-150 мг/л), отмечается значительное снижение коэффициента корреляции по мере снижения концентрации ОВВ. Дополнительная спектральная селекция L , основанная на отношении красного участка спектра к зеленому, позволяет повысить коэффициент корреляции и, соответственно, снизить нижнюю границу регистрации ОВВ до 5-6 мг/л. Однако регистрация струйных потоков взвешенных наносов в толще и в придонном слое (типичные ситуации при любом переносе

взвеси) представляет значительную трудность. Алгоритм подсчета значений температуры по данным снимка LandSat-5 с использованием данных 6-го канала описывается в [4].

Контактные измерения гидрофизических, гидрооптических и гидробиологических параметров водной среды были получены 1-2 августа 2011 года в Керченском проливе сотрудниками МГИ НАН Украины (г. Севастополь) и ЮгНИРО (г. Керчь) в рамках комплексной экспедиции. Съёмка включала 26 станций (рис. 1а) и проводилась с борта маломерного, заякоренного на станциях судна. Диапазон глубин на полигоне - 4-16 м. Массивы исходной информации получены при помощи биофизического комплекса «Кондор» [5]. Температура, соленость, суммарное взвешенное в водной толще вещество и растворенная органика фиксировались в зондирующем режиме с шагом по глубине 0,1 м. Течения измерялись при помощи портативного автономного регистратора, которым снабжен комплекс «Кондор», на горизонтах 0,5 м, 2 м, 4 м и у дна. Дискретность наблюдений за течениями – 20 с. Время экспозиции прибора на горизонтах каждой станции – 20-40 минут. Для анализа использованы средние по каждой из фактических реализаций векторы течений.

Предшествующий съёмке устойчивый ветер над проливом северной четверти (6-10 м/с) и устойчивый слабый (2-6 м/с) ветер западной четверти (265-3000) (рис. 1б), преобладающий в течение экспедиции и за сутки до ее начала, сформировал трансформированный азово-морский тип переноса водных масс.

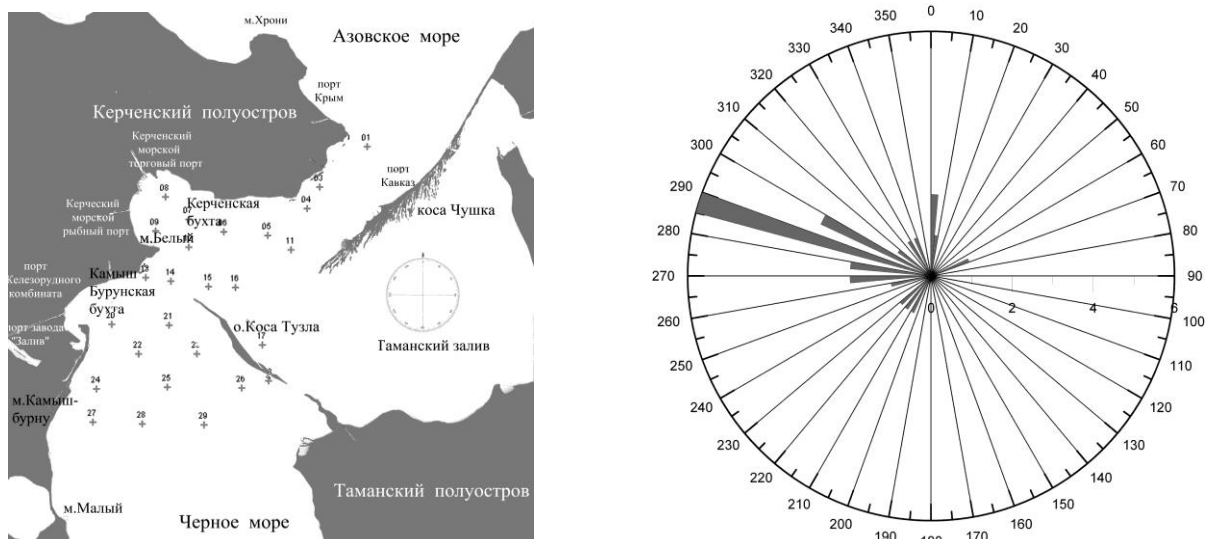


Рис. 1 - Схема океанологических станций (а) и роза ветров над Керченским проливом за время с 31 июля по 2 августа 2011 г (б)

Поле суммарного взвешенного в водной толще вещества отличалось неоднородностью, его концентрация изменялась в пределах от 2,7-3,0 мг/л до 5,5-6,2 мг/л. К значимым факторам, формирующим поле данной характеристики, можно отнести взмучивание водной толщи ветровым волнением при различных видах грунта и его физических свойствах.

Наименьшее содержание суммарной взвеси наблюдалось в южной части пролива на участках с максимальной глубиной, где влияние ветрового волнения незначительно. Макси-

мальная концентрация суммарного взвешенного вещества 6,2 мг/л зафиксирована над отмелью, расположенной в проходе между южной оконечностью косы Чушка и о. Тузла, где процесс взмучивания за счет максимального ветрового разгона должен быть наиболее интенсивным. Отметим, что согласно [6], в области этой отмели штормовой северо-западный ветер способствует формированию наибольшего для пролива содержания суммарного взвешенного вещества. Так, после штормов, вызванных северо-западным ветром, концентрация суммарной взвеси здесь достигает 80 мг/л.

Концентрация растворенного органического вещества изменялась в пределах 2,08-2,45 мг/л и повсеместно незначительно превышала природную норму, которая, по данным [7], для незагрязненных поверхностных вод открытой части Черного моря не превышает 1,5- 2 мг/л.

В рамках исследования при помощи специальной аппаратуры [6] выполнялась контактное измерение таких данных: температура (Т); соленость (S); суммарное взвешенное вещество (мг/л), total suspended matter (TSM); растворенное органическое вещество (мг/л), dissolved organic matter (DOM).

Интерес к оптическим методам исследования природных вод значительно возрос благодаря интенсивному развитию спутниковой океанологии. Но при дистанционных спутниковых исследованиях состояния океанских вод широко использовались так называемые эмпирические алгоритмы решения обратной задачи восстановления биооптических характеристик водных масс. К сожалению, расчеты по простым эмпирическим формулам не дают хороших результатов при исследовании акваторий с небольшой изменчивостью индекса цвета. Поэтому создание регионального алгоритма обработки данных космических сканеров является актуальной проблемой.

Наиболее удобной гидрооптической характеристикой для проведения глобальных дистанционных исследований биооптических свойств поверхностных вод и определения концентраций примесей морской воды по данным измерений восходящего излучения моря является коэффициент яркости моря. Спектр восходящего излучения зависит от взвешенных и растворенных в воде органических веществ, при этом количество неизвестных характеристик среды существенно превышает количество измеренных параметров. Оценка характеристик водных масс по данным коэффициента яркости моря представляет собой классическую обратную задачу.

Рассматривая водную среду как сложную геосистему, структурные составляющие которой генетически объединены взаимозависимыми геофизическими гидрометеорологическими и биологическими процессами, целесообразно применение системных методов. Одним из подходов решения этих задач является исследование факторов, которые обуславливают оптические свойства водной среды. Такие исследования часто выполняют методами корреляционного и регрессионного анализа. В данной задаче предлагается использование многомерной регрессионной модели для установления взаимосвязи между контактными измерениями характеристик водной среды и результатами космической съемки поверхности моря.

Итак, входными данными для точек исследуемой акватории Керченского пролива бу-

дуг контактные измерения характеристик T , S , TSM , DOM и данные спектральной яркости 7 каналов L_1, L_2, \dots, L_7 космического сканера. Целью исследования является определение возможности оценивания параметров водной среды с помощью дистанционного сканирования морской поверхности.

Для достоверного отображения объективно существующих процессов в водной среде необходимо выявить важные взаимосвязи между контактными и дистанционными измерениями. Предполагается, что между указанными переменными величинами существует зависимость, которая является стохастической и включает корреляционные и регрессионные связи. Кроме того, при изучении процессов необходимо не только выявить связь между переменными величинами, но изучить и установить её форму, что и является основной задачей регрессионного анализа [8].

Согласно процедуре регрессионного анализа определим каждую из характеристик T , S , TSM , DOM как результативный признак, а данные каналов космического сканера - как факторные признаки.

В общем виде многомерная линейная регрессионная модель зависимости характеристик от влияющих факторных переменных имеет вид [9]:

$$\begin{aligned} T &= b_{T0} + b_{T1}L_1 + b_{T2}L_2 + \dots + b_{T7}L_7, \\ S &= b_{S0} + b_{S1}L_1 + b_{S2}L_2 + \dots + b_{S7}L_7, \\ TSM &= b_{TSM0} + b_{TSM1}L_1 + b_{TSM2}L_2 + \dots + b_{TSM7}L_7 \\ DOM &= b_{DOM0} + b_{DOM1}L_1 + b_{DOM2}L_2 + \dots + b_{DOM7}L_7, \end{aligned} \quad (1)$$

коэффициенты $b_{Ti}, b_{Si}, b_{TSMi}, b_{DOMi}$, ($i = 0, 1, \dots, 7$) определяются по имеющимся архивным данным контактных измерений характеристик морской воды и космических снимков морской поверхности.

Экологическое состояние водного объекта характеризуется рядом признаков, которые лучше или хуже проявляют себя на космических снимках. Для этого эксперимента по дате был подобран снимок со спутника Landsat-5 [10], фрагмент снимка с обозначенными станциями представлен на рис. 2. Данные для обработки представлены в табл. 1, в которой каналы сканера являются факторными признаками, а контактные измерения характеристик водной среды - результативными признаками регрессионной модели.

Все точки акватории были разделены на учебную (нечетные точки) и проверочную выборки (четные – выделены серым цветом). По данным учебной выборки были получены коэффициенты уравнения (1), а на проверочной - оценивались результаты определения значения характеристик.

По спутниковым данным с применением выражений (1) были вычислены значения указанных характеристик для проверочной выборки. Результаты вычислений представлены в табл. 2.

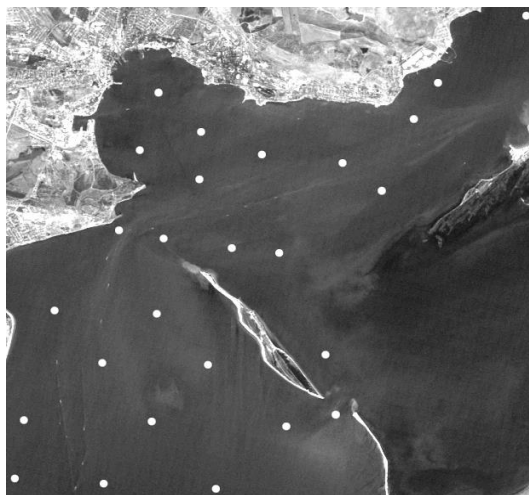


Рис. 2 - Схема океанологических станций на снимке спутника Landsat-5
29 июля 2011 г. в Керченском проливе

Таблица 1 - Контактные измерения характеристик морской среды и
данные со спутника Landsat-5

Станции	Характеристики				Каналы						
	T	S	TSM	DOM	1	2	3	4	5	6	7
1	26,0	12,8	5,1	2,1	68	28	21	13	12	141	8
3	25,9	12,9	4,3	2,2	70	29	20	13	9	142	6
4	25,9	13,1	4,5	2,3	72	29	22	12	9	141	6
5	25,5	13,8	4,3	2,3	77	29	21	12	11	140	7
6	25,1	14,8	4,4	2,2	72	29	20	13	12	140	6
7	25,1	17,0	5,1	2,2	71	28	21	12	10	141	6
8	25,2	16,4	4,6	2,2	74	29	19	11	8	140	6
9	25,1	16,3	5,4	2,2	75	29	19	11	10	140	7
11	25,5	13,8	4,4	2,2	74	30	20	11	9	140	6
12	25,0	17,1	4,8	2,3	75	28	20	11	10	141	7
13	25,6	16,7	4,3	2,3	76	30	20	12	11	140	5
14	25,6	17,3	3,7	2,3	77	28	21	13	12	140	7
15	25,4	17,2	4,2	2,3	75	30	20	12	10	141	6
16	25,9	17,3	4,2	2,2	71	30	20	12	10	142	7
17	26,5	17,4	4,4	2,1	74	27	18	11	9	140	6
18	25,7	17,2	4,3	2,2	76	29	19	12	10	140	8
20	24,8	17,5	4,3	2,1	73	28	20	12	12	141	8
21	25,2	17,2	4,3	2,1	78	29	21	12	10	140	6
22	25,2	17,2	3,7	2,1	78	30	20	11	9	140	7
23	25,5	17,2	3,7	2,2	74	29	21	12	11	142	7
24	25,3	17,5	3,4	2,0	75	28	19	12	11	140	7
25	25,4	17,4	3,1	2,2	76	28	18	12	11	140	7
26	25,8	17,4	2,8	2,1	77	29	19	12	11	140	5
27	25,4	17,5	4,4	2,1	74	27	18	12	10	140	6
28	25,5	17,3	2,8	2,2	75	27	19	11	11	140	7
29	25,5	17,3	3,2	2,1	77	27	19	11	11	141	6

Таблица 2 - Расчетные значения для проверочных точек

Станции	T	S	TSM	DOM
4	25,3	14,4	5,2	2,2
6	26,2	15,3	4,6	2,2
8	25,2	15,4	4,9	2,2
12	25,5	16,5	4,2	2,1
14	25,3	16,0	3,9	2,1
16	25,2	14,5	4,2	2,3
18	25,0	14,7	4,2	2,2
20	25,4	15,4	4,1	2,1
22	25,6	15,4	4,4	2,2
24	25,3	16,1	4,1	2,1
26	26,0	17,9	3,7	2,2
28	25,8	17,1	4,3	2,1

Вычисления для отдельных станций дают различную погрешность, средние погрешности по всем станциям следующие: наименьшая - для температуры 2%, для солёности - 9%, суммарного взвешенного вещества - 4% и растворенного органического вещества - 12%. Процентный вклад каждого из каналов при определении значений каждой из характеристик водной среды T, S, TSM, DOM показано на рис. 3.

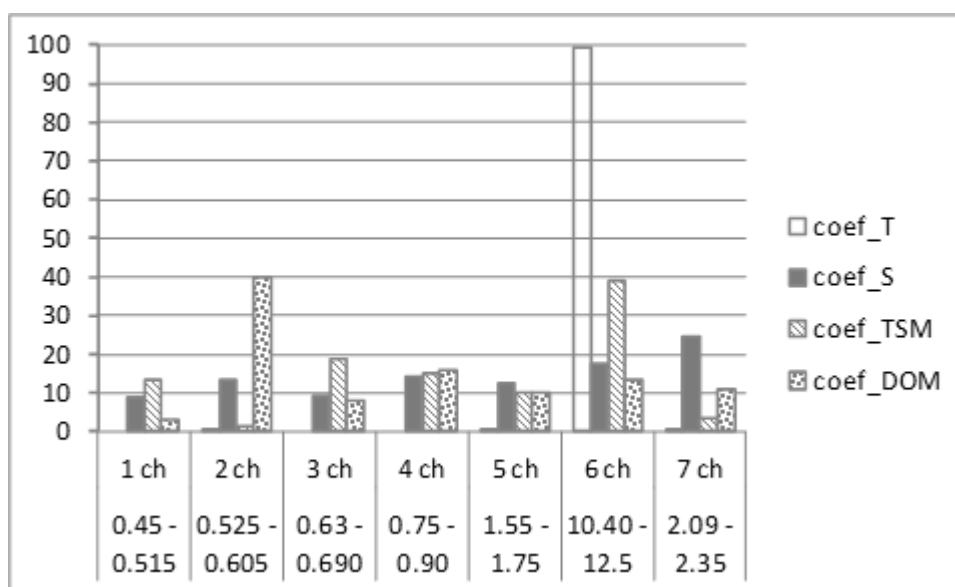


Рис. 3 - Процентный вклад каналов Landsat-5 в характеристики T, S, TSM, DOM (на горизонтальной оси указаны номера каналов и их спектральные интервалы в мкм, на вертикальной - проценты)

Так как в предложенной многомерной линейной регрессионной модели вклад 6-го канала составляет 98% (рис. 3), этот факт соответствует алгоритму подсчета значений температуры по данным снимка LandSat-5 с использованием данных 6-го канала [4].

Оптические методы контроля состояния водоемов позволяют достаточно эффективно исследовать экологические проблемы водных бассейнов. Эти методы основаны на использо-

вании спектральных различий поглощения, рассеяния и флуоресценции света такими оптически активными примесями водной среды, как фитопланктон, минеральная взвесь и растворенное органическое вещество. Следовательно, на современном этапе развития спутниковых технологий получения и интерпретации изображений водных акваторий появилась реальная возможность создавать на их основе непрерывно действующие системы диагноза и контроля состояния морских экосистем. Однако, для распространения этих методов на другие акватории необходимы дополнительные региональные исследования.

Список использованной литературы

1. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии / Бондур В.Г./ "Новые идеи в океанологии". Т1: Физика. Химия. Биология [Отв. ред. М.Е. Виноградов, С.С. Лаппо.] – М. : Наука, 2004. – С. 55 – 117.
2. J.C. Ritchie. Remote Sensing of Suspended Sediments in Surface Water / J.C.Ritchie, F.R. Schiebe, J.R. McHenry. // Journal of American Society of Photogrammetry. – Vol. 42. – No. 2. – American Society of Photogrammetry, 1976. – pp. 1539-1545.
3. P. J. Curran. The Relationship Between Suspended Sediment Concentration and Remotely Sensed Spectral Radiance: A Review / P. J. Curran, E. M. M. Novo // Journal of Coastal Research. – Vol. 4. – No. 3 – Coastal Education & Research Foundation, Inc., 1988. – pp. 351-368.
4. Gyanesh Chander. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. / Gyanesh Chander, Brian Markham // IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING. – Vol. 41. – No. 11. – IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 2003.
5. Комплекс гидробиофизический мультипараметрический погружной автономный «КОНДОР» [Электронный ресурс] – Режим доступа до сторінки: <http://ecodevice.com.ua/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor>
6. Ломакин П. Д. Природные и антропогенные изменения в полях важнейших абиотических элементов экологического комплекса Керченского пролива в течение двух последних десятилетий. / Ломакин П. Д., Спиридонова Е.О. –Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – 118 с. – ISBN 978-966-02-5503-6
7. Хайлов К.М. Экологический метаболизм в море / Хайлов К.М. – К. : Наукова думка, 1971. – 250 с. – ISBN –.
8. Норман Дрейпер. Прикладной регрессионный анализ = Applied Regression Analysis / Норман Дрейпер, Гарри Смит. – Изд. 3-е. – М. : Диалектика, 2007. –912 с. – ISBN 978-5-8459-0963-3.
9. Кендалл М. Многомерный статистический анализ и временные ряды. / Кендалл М., Стюарт А. – М. : Наука, 1976. – 736 с. – ISBN –.
10. USGS Global Visualization Viewer [Электронный ресурс] – Режим доступа до сторінки: <http://glovis.usgs.gov/>

Стаття надійшла до редакції 11.12.12 російською мовою

© О.Д. Федоровський, А.Ю. Поружкевич, А.А. Чепиженко, В.Г. Якимчук
Регіональні алгоритми дослідження морських акваторій за даними
космічної зйомки на прикладі Керченської протоки

Метою дослідження є визначення можливості оцінки характеристик водного середовища за допомогою дистанційного сканування морської поверхні за допомогою сучасних космічних методів та засобів. У рамках дослідження для Керченської протоки були використані синхронні контактні виміри на 26 станціях: температури (T), солоності (S), сумарної зваженої речовини (TSM), розчиненої органічної речовини (DOM), а також дані спектральної яскравості 7 каналів супутника Landsat-5. На основі отриманих даних, методом найменших квадратів була побудована лінійна регресійна модель залежності характеристик T, S, TSM, DOM від впливових факторних змінних – спектральної яскравості 7-ми каналів Landsat-5. Обчислені згідно з побудованою моделлю характеристики мають похибку від 2% до 12%, що свідчить про можливість застосування космічної системи для контролю стану морських екосистем.

© A.D. Fedorovskij, A.Y. Porushkevich, A.A. Chepyzhenko, V.G. Yakymchuk
Regional algorithms for studies of water areas according to the data
from space surveys through the example of the Kerch strait

The purpose of this study was to determine the possibility of evaluating the characteristics of the aquatic environment using remote scanning the sea surface and modern space techniques and tools. Simultaneous probing on 26-stations: temperature (T), salinity (S), total suspended matter (TSM), dissolved organic matter (DOM), and the data from Landsat-5 satellite of Kerch Strait were used during this study. Multivariate linear regression model of dependences of T, S, TSM, DOM on the influencing factor of variables - the spectral brightness of Landsat 5 channel s was constructed using the method of least squares. Characteristics of the water environment calculated by the model have error between 2% and 12% which means the possibility of using space systems for the monitoring of marine ecosystems.