

Мониторинг динамики Черного моря на основе спутниковых технологий

Статья посвящена обзору принципов и методов спутникового мониторинга океана и анализу перспектив приложения спутниковых измерений для оперативного диагноза и прогноза циркуляции Черного моря. Обсуждаются физические основы дистанционного зондирования, возможности современных аппаратных комплексов для наблюдений морской поверхности с ИСЗ, а также применение ИСЗ как ретрансляторов данных измерений со свободнодрейфующих буев. Современные океанографические исследования с ИСЗ позволяют использовать полученные данные для численного расчета течений в морях и океанах в модели общей циркуляции, а также для создания системы оперативного диагноза и прогноза состояния морской среды. Приводятся примеры опытной реализации элементов системы оперативного диагноза состояния Черного моря на основе использования ИСЗ и оцениваются перспективы прогнозирования течений в бассейне.

Введение. Использование ИСЗ в океанографии имеет долгую историю. Первоначальные визуальные наблюдения океана из космоса трансформировались затем в измерительные принципы, апробированные в рамках экспериментальных спутниковых программ, интенсивно реализовывавшихся в 60 – 80-е годы прошлого века. Развитие дистанционных методов наблюдений морской поверхности с ИСЗ достигло совершенно нового уровня в течение последних пятнадцати лет. В эти годы произошел переход от экспериментов к опытной эксплуатации спутниковых систем наблюдения океана из космоса. Современная аппаратура дистанционного зондирования позволяет проводить регулярные наблюдения в широкой полосе с высоким пространственным разрешением, что делает возможным обновлять наблюдения с высокой частотой. Точность дистанционных измерений вполне соответствует требованиям океанологической практики. В силу этого дистанционное зондирование из космоса рассматривается сейчас как основной источник непрерывно поступающей информации о Мировом океане и его изменчивости.

Другое направление практического использования ИСЗ в качестве средства связи, основы современных навигационных систем и ретрансляторов информации также нашло эффективное приложение в океанографии. Измерения с различного рода платформ, располагающихся зачастую в удаленных частях океана, ретранслируются с помощью ИСЗ непосредственно в центры сбора данных в режиме реального времени. Весьма эффективным в океанографии оказалось использование свободнодрейфующих платформ.

К настоящему времени наблюдательная система на основе ИСЗ в комплексе с моделями циркуляции позволяет осуществлять непрерывный мониторинг морской динамики с высоким пространственным разрешением. Стоимость такой наблюдательной системы намного ниже стоимости прежних океанографических систем, основывавшихся на судовых наблюдениях. Реализация эффективной наблюдательной системы в Черном море, основанной на широком использовании ИСЗ, является особо актуальной проблемой, поскольку прибрежные государства имеют весьма ограниченные экономические возможности для проведения океанографических наблюдений.

Основы дистанционного зондирования океана. Основой дистанционного зондирования Земли является прием на ИСЗ собственного электромагнитного излучения Земли, а также отраженного и рассеянного солнечного или искусственного электромагнитного излучения. Наблюдения поверхности Земли из космоса проводятся с использованием длин волн, на которых принимаемое излучение зависит от свойств подстилающей поверхности, а влияние атмосферы несущественно или может быть учтено с достаточной точностью. Имеется три метода наблюдений поверхности океана из космоса. Один из них основан на наблюдениях отраженного или рассеянного морской поверхностью солнечного света, другой — собственного излучения Земли. При применении третьего метода используют активную радиолокацию морской поверхности с ИСЗ.

Наиболее популярным является использование солнечного света для наблюдений океана из космоса. Отраженный от морской поверхности или рассеянный в морской толще свет несет информацию о волнении, взвешенном и растворенном в морской воде веществе.

Определенным недостатком наблюдений в видимом участке спектра является возможность их осуществления только в дневное время. Другим неудобством является невозможность наблюдений Земли в облачных условиях. Наблюдения в видимом диапазоне также заметно искажаются атмосферным аэрозолем, дымкой и туманом. Поэтому наиболее эффективными являются наблюдения при ясной погоде и прозрачной атмосфере.

Поверхность Земли, как и все физические объекты с температурой, отличной от абсолютного нуля, излучает электромагнитные волны. Собственное излучение земной поверхности достаточно интенсивно и регистрируется в ИК-участке спектра и на более длинных волнах. Излучение тела определяется его температурой и коэффициентом излучательной способности. Этот коэффициент, в свою очередь, может зависеть от температуры тела или других его характеристик (например от солености морской воды) и от геометрии поверхности тела.

Излучение в ИК-участке спектра, как правило, используется для наблюдения термических контрастов подстилающей поверхности. Современные ИК-радиометры позволяют проводить наблюдения в широкой полосе около 2000 км. В зависимости от высоты орбиты спутника они имеют разрешение на поверхности Земли от нескольких сотен метров до нескольких километров. Облачность в ИК-диапазоне, так же как и в видимом участке спектра волн, полностью непроницаема для излучения. Поэтому наблюдения земной поверхности возможны только в безоблачных условиях. Облака, которые хорошо видны на спутниковых изображениях в видимом диапазоне, не столь контрастно выделяются на фоне подстилающей поверхности на ИК-снимках. В силу этого в состав ИК-радиометра, как правило, включают также канал в видимом диапазоне, используемый для выделения безоблачных участков.

Собственное излучение подстилающей поверхности является информативным и в области более длинных волн, в частности в диапазоне радиочастот. Основным преимуществом наблюдений подстилающей поверхности на длинах волн от миллиметров до нескольких десятков сантиметров (микроволновая или сверхвысокочастотная область спектра) является высокая «про-

зрачность» атмосферы в этом частотном диапазоне. Даже облака прозрачны для радиоволн, причем прозрачность атмосферы тем выше, чем больше длина волны излучения. На длинах волн до нескольких сантиметров облака и водяной пар в атмосфере все еще влияют на излучение, проходящее через атмосферу. На более длинных волнах сигнал от поверхности Земли доминирует, и только сильные обложные дожди вносят искажения в наблюдаемую картину.

Дистанционные измерения собственного излучения подстилающей поверхности в области радиочастот свободны от многих недостатков, присущих наблюдениям Земли в видимом и инфракрасном диапазонах спектра электромагнитных волн. К сожалению, они имеют собственные недостатки. В частности, серьезной проблемой является осуществление точной внутренней калибровки микроволновых радиометров. Трудность состоит в том, что измерительные тракты подвержены различным флуктуациям, и необходимо поддерживать сопоставимость начального отсчета и масштаба сигнала в разные моменты времени, что является сложной технической задачей.

Другая проблема связана с пространственным разрешением радиометров, работающих в области радиочастот. Общая закономерность измерительных систем, основанных на приеме электромагнитного излучения, состоит в том, что чем больше длина волны, используемая для наблюдений, тем большие габариты должно иметь приемное устройство. Поэтому при проведении наблюдений в видимом свете легче добиться высокого пространственного разрешения. Наблюдательные системы, работающие в ИК-диапазоне спектра волн, имеют уже худшее пространственное разрешение. При использовании радиочастот пространственное разрешение на поверхности Земли зависит от размера принимающей антенны. Чем длиннее волна излучения, тем больше должна быть антенна, чтобы добиться одного и того же пространственного разрешения. Типичное пространственное разрешение современных микроволновых радиометров находится в интервале от нескольких километров для миллиметровых волн до нескольких десятков километров для электромагнитных волн длиной 30 – 70 см.

Следующий метод дистанционного зондирования основан на активной радиолокации поверхности Земли. Атмосфера и даже облака прозрачны при использовании радиочастот, и поэтому локационные методы являются практически всепогодным инструментом наблюдений.

Существует две возможности активного облучения поверхности Земли с ИСЗ: непосредственно вниз вдоль вертикали (в надир) и под некоторым углом к наблюдаемой поверхности. На практике применяются оба вида наблюдений. Наблюдения в надир производятся радиолокационными альтиметрами. Эти радиолокаторы работают в импульсном режиме, посылая импульс вертикально вниз и принимая сигнал, отраженный от поверхности Земли. Альтиметр измеряет время прохождения импульсом расстояния до подстилающей поверхности и обратно, а также искажение формы импульса. Время от посылки импульса до его приема на спутнике и знание скорости распространения радиоволн в атмосфере используются для вычисления расстояния от ИСЗ до поверхности Земли. Искажение формы импульса применяется для характеристики степени шероховатости подстилающей поверхности. Поскольку скорость распространения радиоволн зависит от состояния атмосфе-

ры, в состав альтиметрического комплекса входит микроволновый радиометр, позволяющий оценивать интегральное содержание водяного пара в атмосфере. Так как импульс излучается вертикально вниз, альтиметрические измерения проводятся только вдоль трассы пролета спутника. Альтиметрический радиолокатор работает на длине волны около 10 см, где атмосфера прозрачна, поэтому наблюдения возможны практически при любых погодных условиях, за исключением областей сильных осадков.

Шероховатость подстилающей поверхности является одним из информативных параметров, которые используются при наблюдениях с ИСЗ. Такие наблюдения проводятся радиолокаторами, излучающими импульсы под наклоном к вертикали. Как правило, наблюдения проводятся на длинах волн от нескольких сантиметров до десяти сантиметров. Посылаемый импульс рассеивается на неоднородностях подстилающей поверхности. Рассеянный сигнал принимается радиолокатором. Интенсивность принятого сигнала характеризует степень шероховатости поверхности.

Пространственное разрешение радиолокатора, работающего под наклонными углами, определяется продолжительностью излучаемого импульса и размером антенны. Излучение импульса в разных направлениях позволяет осуществлять сканирование подстилающей поверхности и получать ее изображение. В настоящее время применяются три типа спутниковых радиолокационных систем.

Относительно простая радиолокационная система, использующая некогерентное излучение, называется радиолокатором с реальной апертурой, или радиолокатором бокового обзора (РБО), поскольку наблюдения проводятся в полосе, расположенной сбоку от трассы пролета спутника. РБО устанавливались на спутниках серии «Океан». Радиолокатор этого типа проводит наблюдения на длине волны 3 см в полосе шириной 400 км с пространственным разрешением 1,5 – 2,0 км.

Пространственное разрешение радиолокатора с реальной апертурой ограничивается размером антенны. Однако использование когерентного излучения позволяет добиться существенного улучшения пространственного разрешения при том же размере антенны. Когерентное излучение используется в радиолокаторах с синтезированием апертуры (РСА). Принцип работы РСА основан на возможности обзора одного и того же элемента подстилающей поверхности под разными углами за счет движения спутника. Поскольку скорость движения спутника относительно поверхности Земли велика, то удается получить большое количество отраженных импульсов в течение промежутка времени, за который характеристики поверхности изменяются незначительно. При движении спутника фазовые характеристики принимаемых импульсов изменяются, что позволяет посредством сложной обработки добиться высокого пространственного разрешения изображения поверхности. Аналогичное разрешение радиолокатором с реальной апертурой потребовало бы очень большого размера антенны. В РСА же высокое разрешение достигается посредством обработки, т. е. синтезированием апертуры. РСА обычно работают на длинах волн около 10 см и имеют пространственное разрешение порядка 10 м.

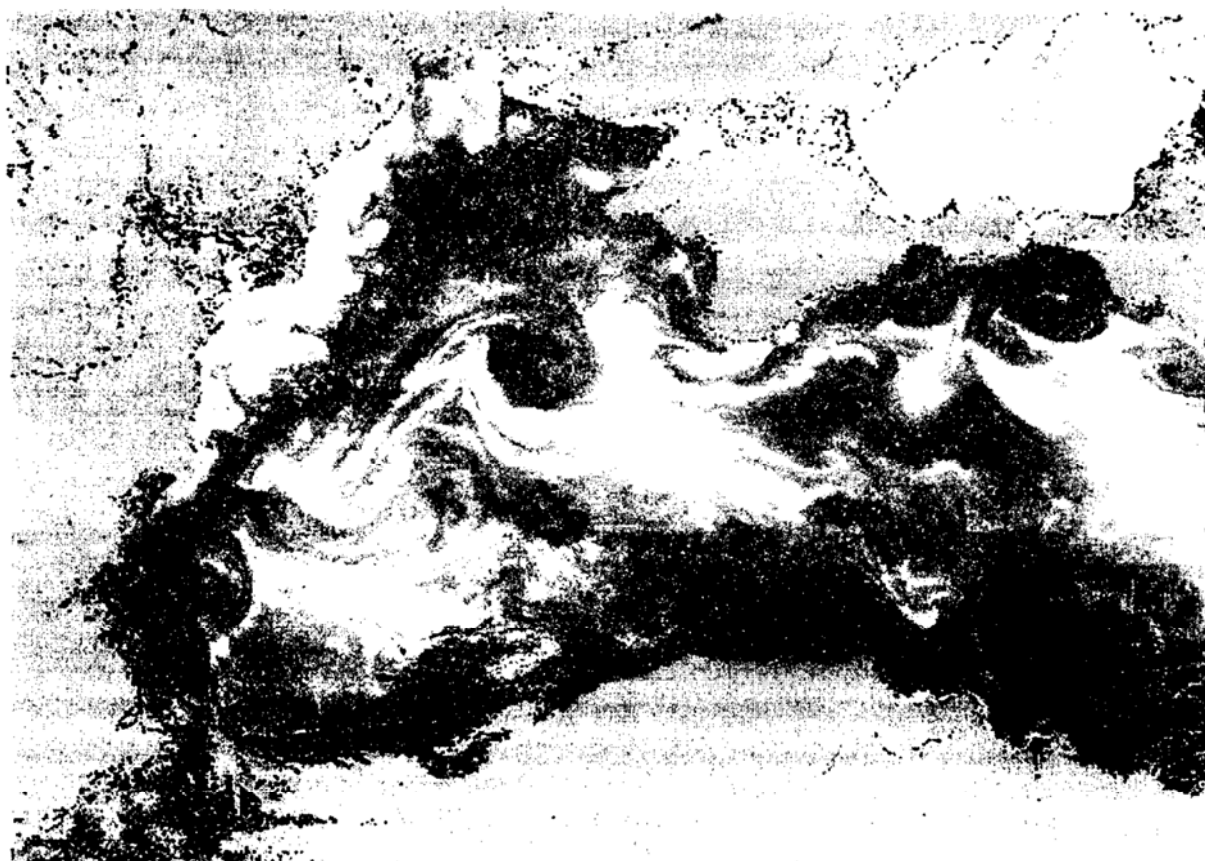
Поскольку свойства поверхности характеризуются не только интенсивностью рассеяния, но и угловой структурой рассеянного сигнала, при проведении наблюдений с ИСЗ применяются специальные радиолокаторы, называемые скаттерометрами. Скаттерометр работает так же, как и РБО, но имеет три сканирующих луча. Наблюдения тремя сканирующими лучами позволяют «осматривать» один и тот же элемент подстилающей поверхности под разными углами и восстанавливать угловую структуру рассеянного сигнала. С помощью современных скаттерометров проводят наблюдения на длине волны 3 см в полосе 1000 км с пространственным разрешением около 10 км. Скаттерометрические наблюдения также являются практически всепогодными.

Принципы работы многоканальных систем дистанционного зондирования. Наблюдения океана из космоса дают возможность производить качественное описание многих океанических процессов и явлений. Однако целый ряд практически важных проблем требует количественной характеристики текущего состояния океана и возможности осуществлять прогноз его изменений. Поэтому одной из основных задач дистанционного зондирования океана является разработка методов наблюдений, создание аппаратуры и алгоритмов обработки спутниковых данных, которые в комплексе позволили бы проводить количественные измерения целого набора наиболее важных параметров. Как уже отмечалось выше, при использовании методов дистанционного зондирования типичной является ситуация, когда принимаемое на спутнике электромагнитное излучение зависит от целого набора параметров, характеризующих состояние океана и атмосферы. При проведении наблюдений морской поверхности выбираются такие длины волн, на которых преобладающий вклад в излучение вносил бы какой-нибудь один параметр, а атмосферное влияние было бы минимальным. Такой подход, однако, неэффективен при попытке оценить состояние океана количественно. Влияние атмосферы, хоть и слабое, как правило, настолько искажает излучение, восходящее от поверхности моря, что точность определения необходимых параметров оказывается ниже требуемой. Кроме того, сам сигнал, восходящий от моря, зачастую зависит от нескольких параметров. Например, контрасты на поверхности моря в видимом диапазоне могут формироваться как поглощением, так и рассеянием, и необходимо уметь различать количественно эти вклады.

Для решения отмеченных проблем разработаны эффективные методы, основанные на проведении многоканальных измерений. Общая идея применения многоканальных измерений заключается в выборе основного канала, где в излучении превалирует вклад измеряемого параметра. Затем используются дополнительные измерения на нескольких других длинах волн, чтобы скорректировать нежелательные вклады других параметров и достигнуть необходимой точности измерений. При этом уровень понимания закономерностей формирования и трансформации излучения, достигнутый к настоящему времени, оказывается вполне достаточным для правильного выбора необходимых длин волн и разработки алгоритмов обработки многоканальных измерений. Поэтому многоканальные системы дистанционного зондирования являются основным инструментом проведения количественных измерений состояния морской поверхности.

Алгоритм обработки многоканальных измерений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах разработан для вычисления концентрации хлорофилла (одного из пигментов фитопланктона) по данным измерений с ИСЗ. На первом этапе обработки используются измерения в ближнем ИК-диапазоне на длине волны 865 нм для оценки атмосферного влияния. Морская вода слабо рассеивает свет на длинах волн более 650 нм, поэтому по измерениям излучения на длинах волн 670 и 865 нм оценивается спектральный ход аэрозольной оптической толщи. Экстраполяция установленной закономерности в область более коротких волн позволяет учесть как молекулярное, так и аэрозольное рассеяние в атмосфере и рассчитать излучение, восходящее из моря. Наконец, с учетом эмпирической связи между восходящим из моря излучением и концентрацией хлорофилла строится карта его распределения.

Коэффициент излучательной способности морской воды практически постоянен в ИК-диапазоне, поэтому контрасты температуры поверхности океана (ТПО) определяют интенсивность излучаемой тепловой радиации (рис. 1). Однако восходящее от морской поверхности тепловое излучение частично поглощается в атмосфере (главным образом водяным паром). Кроме того, установленный на спутнике ИК-радиометр принимает также собственное тепловое излучение атмосферы. В окнах прозрачности атмосферы эти искажения не столь значительны. Тем не менее для достижения необходимой точности определения ТПО требуется вносить коррекцию в одноканальные измерения. В настоящее время для определения ТПО с точностью $0,5^\circ$ используются двух- или трехканальные измерения. Например, для определения ТПО по данным сканера *AVHRR* используются наблюдения на длинах волн 3,7; 10,5 и 12 мкм.



Р и с. 1. ИК-изображение Черного моря (снимок любезно предоставлен С.В. Станичным)

Облака непрозрачны для ИК-излучения, поэтому каждая отдельная карта ТПО содержит много пробелов. Окончательно глобальная или региональная карта ТПО строится методом композиции посредством заполнения образовавшихся пробелов измерениями, выполненными в разные моменты времени, и осреднения данных наблюдений во времени и в пространстве. При этом, чтобы обеспечить лучшее временное разрешение, приходится жертвовать пространственным разрешением и наоборот.

Радиочастоты обладают серьезным преимуществом перед наблюдениями в видимом и инфракрасном участках спектра, поскольку для них атмосфера практически прозрачна даже при наличии облачности. Тем не менее водяной пар и водозапас облаков должны приниматься во внимание при проведении измерений параметров морской поверхности. Коэффициент излучательной способности морской воды в области длин волн от миллиметров до дециметров, наиболее информативной при наблюдениях океана, зависит от температуры и солености морской воды, а также от степени запененности поверхности моря, которая, в свою очередь, непосредственно связана со скоростью приводного ветра. Чувствительность принимаемого на спутнике излучения к изменениям параметров, характеризующих состояние атмосферы и океана, различна на разных длинах волн. Поэтому многоканальные микроволновые измерения позволяют определять целый набор параметров, выбирая один из каналов в качестве базового и используя остальные для внесения коррекции.

Учитывая всепогодность микроволновых измерений, прежде всего они были использованы для определения температуры подстилающей поверхности. Однако технические трудности точной калибровки радиометров позволили определять ТПО со среднеквадратичной погрешностью порядка 1° , т. е. с меньшей точностью, чем по данным ИК-измерений. Другая трудность при проведении микроволновых измерений связана с пространственным разрешением. При разумных размерах антенны микроволновые радиометры способны обеспечивать пространственное разрешение в несколько километров на миллиметровых волнах и несколько десятков километров на дециметровых. Для измерений ТПО основным должен быть канал на длине волны около 5 см, для которого пространственное разрешение будет не больше 10 – 20 км. Прибор с таким пространственным разрешением не может правильно воспроизводить различные мезомасштабные структуры (фронтальные зоны, вихри, меандры и т. д.) и, следовательно, не способен конкурировать с ИК-измерениями ТПО.

Другим параметром, который можно измерять микроволновым радиометром, является скорость приводного ветра. Пространственное разрешение микроволнового радиометра вполне пригодно для этой задачи, учитывая масштаб изменения поля ветра. Сравнение микроволновых измерений скорости приводного ветра со скоростью среднеклиматического показывает высокое качество поля ветра, построенного по данным микроволновых радиометрических измерений.

Микроволновые радиометры в принципе дают возможность также проводить измерения поверхностной солености. При этом следует использовать дециметровые волны длиной порядка 70 см, где чувствительность излучения к изменениям солености наибольшая. Учитывая важность информации о со-

лености поверхностных вод и отсутствие других возможностей проводить ее глобальные измерения на регулярной основе, даже пространственное разрешение в несколько десятков километров представляется приемлемым. Спутниковые измерения поверхностной солености пока отсутствуют. Однако уже проведена серия обнадеживающих самолетных экспериментов.

Как показывают наблюдения, поверхностные волны длиной в несколько сантиметров генерируются непосредственно ветром и реагируют на его изменения практически моментально. Поэтому радиолокационный сигнал, рассеянный на сантиметровых волнах, несет информацию о приводном ветре. При ветровом воздействии сантиметровые волны распространяются в основном в направлении действия ветра. Вместе с тем возбуждается также целый спектр волн, распространяющихся под разными углами симметрично по отношению к направлению ветра. В итоге идеальная диаграмма рассеяния радиоволн на сантиметровых волнах является функцией скорости ветра и угла относительно его направления. Поэтому измерение рассеяния радиоволн под несколькими углами дает возможность измерять вектор скорости приводного ветра. Этот принцип положен в основу скаттерометрических измерений поля приводного ветра с ИСЗ. Реальная диаграмма рассеяния радиоволн сантиметровыми поверхностными волнами искажается более длинными ветровыми волнами, но тем не менее уже трехлучевая система позволяет проводить измерения поля ветра с удовлетворительной точностью. С помощью современных скаттерометров проводят измерения в полосе порядка 1000 км, что позволяет осуществлять рутинное картирование поля ветра в масштабе Мирового океана.

Спутниковый альтиметр является одним из уникальных приборов, применяемых при дистанционном зондировании океана. Он измеряет расстояние от спутника до поверхности моря, испуская радиоимпульсы вертикально в направлении поверхности Земли. Расстояние от спутника до поверхности моря вычисляется по времени прохождения радиоимпульса от спутника до морской поверхности и отраженного от поверхности сигнала в обратном направлении при известной скорости распространения радиоволн в атмосфере. Для точного вычисления изменений уровня моря вдоль трассы пролета спутника необходимо дополнительно оценивать состояние атмосферы для точного вычисления скорости распространения радиоволн, рассчитывать орбиту спутника с высокой точностью и учитывать пространственные изменения земного геоида. Учет реальной формы геоида является сейчас наиболее трудной проблемой, поэтому после сложной обработки современных альтиметрических измерений в качестве окончательного продукта выдается аномалия уровня моря относительно его среднего значения. Относительные вариации уровня моря при этом измеряются с погрешностью около 4 см. Такая точность достаточна для наблюдения приливов в океане и колебаний уровня в таких полу-замкнутых морях, как Черное и Средиземное.

Однако главное достоинство альтиметра заключается в том, что он способен измерять наклоны уровенной поверхности. Как известно, наклоны уровня поверхности моря характеризуют интенсивность градиентных поверхностных течений. Вдали от экватора скорость поверхностных градиент-

ных течений находится из геострофического соотношения согласно формулам

$$-fv = g \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \quad fu = g \frac{\partial \zeta}{\partial y},$$

где u, v — проекции скорости течения на оси координат, f — параметр Кориолиса, g — ускорение силы тяжести и ζ — уровень моря. Как известно, уровень морской поверхности эквивалентен динамической топографии. Поэтому построенная по данным альтиметрических измерений карта топографии морской поверхности должна отражать основные черты крупномасштабной океанической динамики. Согласно приложениям динамического метода к расчету океанических течений, уровень моря с неплохой точностью может быть вычислен по формуле

$$\zeta \approx \frac{1}{\rho_0} \int_{-D}^0 \rho dz,$$

где D — аномалия плотности морской воды, а ρ_0 — средняя плотность морской воды. Интегрирование ведется от некоторой нулевой поверхности, вместо которой при практических расчетах может быть взят любой горизонт, на котором изменения плотности морской воды незначительны.

Из приведенной формулы следует, что динамическая топография морской поверхности отражает процессы, протекающие в глубинах океана. Поэтому на картах уровня поверхности моря должны проявляться синоптические вихри, планетарные волны, меандры течений и т.д. При этом среднеквадратичные вариации морской поверхности, рассчитанные осреднением по времени, должны выявлять области повышенной изменчивости.

Использование ИСЗ как ретрансляторов измерений. Дистанционное зондирование не является единственным методом применения спутников в океанологии. Значительный вклад в развитие океанографической наблюдательной системы дает использование ИСЗ как ретрансляторов данных наблюдений с разного рода измерительных платформ.

Использование ИСЗ как ретрансляторов контактных измерений позволило развить новый метод наблюдений с поверхностных дрейфующих буйев (дрифтеров). Дрифтеры, с одной стороны, применяются как платформы, данные с которых ретранслируются через ИСЗ, а с другой, будучи снабженными подводным парусом, позволяют измерять скорость поверхностных течений. Суть метода наблюдений поверхностных течений состоит в определении положения дрифтера с помощью размещенной на спутнике навигационной системы и одновременной передаче информации с буя через ИСЗ на наземные приемные центры. Знание координат положения буя в два последовательных момента времени позволяет рассчитать среднюю скорость его переноса.

Новые технические возможности в наблюдении глубоководных процессов дают буи-профилемеры. Эти буи свободно дрейфуют на заданной глубине в течение заданного промежутка времени, по окончании которого всплывают на поверхность. В процессе всплытия установленные на бус датчики измеряют профили температуры, солёности или другие характеристики морской среды. Находясь на поверхности, буи транслируют данные измерений

через спутник в приемный центр и, так же как и поверхностные дрейтеры, определяют свои координаты. Затем буи опять погружаются на заданную глубину. Знание координат буйев при погружении и при всплытии позволяет оценивать скорость течения на глубине дрейфа буя. Буй-профилемеры существенно дополняют возможности альтиметров, поскольку дают информацию о глубинной изменчивости полей температуры и солености.

Использование ИСЗ в оперативной океанографии. Развитие методов дистанционного зондирования создает уникальные возможности реализации оперативной системы диагноза и прогноза состояния океана. ИСЗ, находящиеся в настоящее время на орбите, передают данные измерений на рутинной основе и в режиме времени, максимально приближенном к реальному. Даже в тех случаях, когда первичные измерения требуют достаточно сложной обработки, распространение окончательных продуктов происходит в течение трех – четырех дней. Дистанционные измерения сами по себе, конечно, характеризуют в основном только поверхность океана и не могут дать подробную информацию о процессах, происходящих в его толще. Однако важным является то обстоятельство, что спутниковые измерения полностью характеризуют потоки импульса, тепла и, в перспективе, влаги на поверхности океана. Поэтому дистанционные измерения с ИСЗ могут полностью обеспечить оперативное функционирование моделей океанической циркуляции в том же режиме, как это делается при диагнозе и прогнозе состояния атмосферы при формировании метеорологических прогнозов погоды.

Океанические модели для оперативного функционирования нуждаются в задании граничных условий. Прежде всего необходимо знать распределение на поверхности тангенциального напряжения трения ветра. Ветер является движущей силой не только дрейфовых течений, но и градиентных, вызывая наклоны уровня моря и изопикнических поверхностей. Напряжение трения ветра вычисляется через вектор скорости приводного ветра. Поэтому скаттерометрия дает возможность регулярного воспроизведения одного из граничных условий на поверхности моря — тангенциального напряжения трения ветра.

Следующим граничным условием, которое необходимо задать, является либо поток тепла на поверхности океана, либо температура его поверхности. Сканерные ИК-наблюдения позволяют картировать ТПО, что закрывает проблему задания термических граничных условий на поверхности моря. Дистанционные ИК-измерения дают также информацию о поступающей на поверхность океана коротковолновой радиации, обеспечивающей нагрев моря и входящей в уравнение теплопроводности в качестве источника.

Наконец, интегрирование уравнения переноса соли требует постановки на поверхности океана граничного условия, задающего водообмен с атмосферой. В качестве альтернативы возможно задание поверхностной солености, измерения которой с ИСЗ, скорее всего, станут доступными в ближайшее время.

Поскольку современные модели океанической циркуляции пока еще далеки от совершенства, для обеспечения надежного диагноза и прогноза состояния океана крайне желательно привлекать дополнительные наблюдения, характеризующие состояние его глубинных слоев. Такую информацию дают

альтиметры. Коррекция результатов расчета состояния океана осуществляется посредством ассимиляции данных альтиметрических измерений в моделях динамики океана. Повышение точности прогноза состояния морской среды осуществляется также посредством ассимиляции доступных из разных источников профилей температуры и солёности морской воды, в частности измеряемых буями-профилемерами.

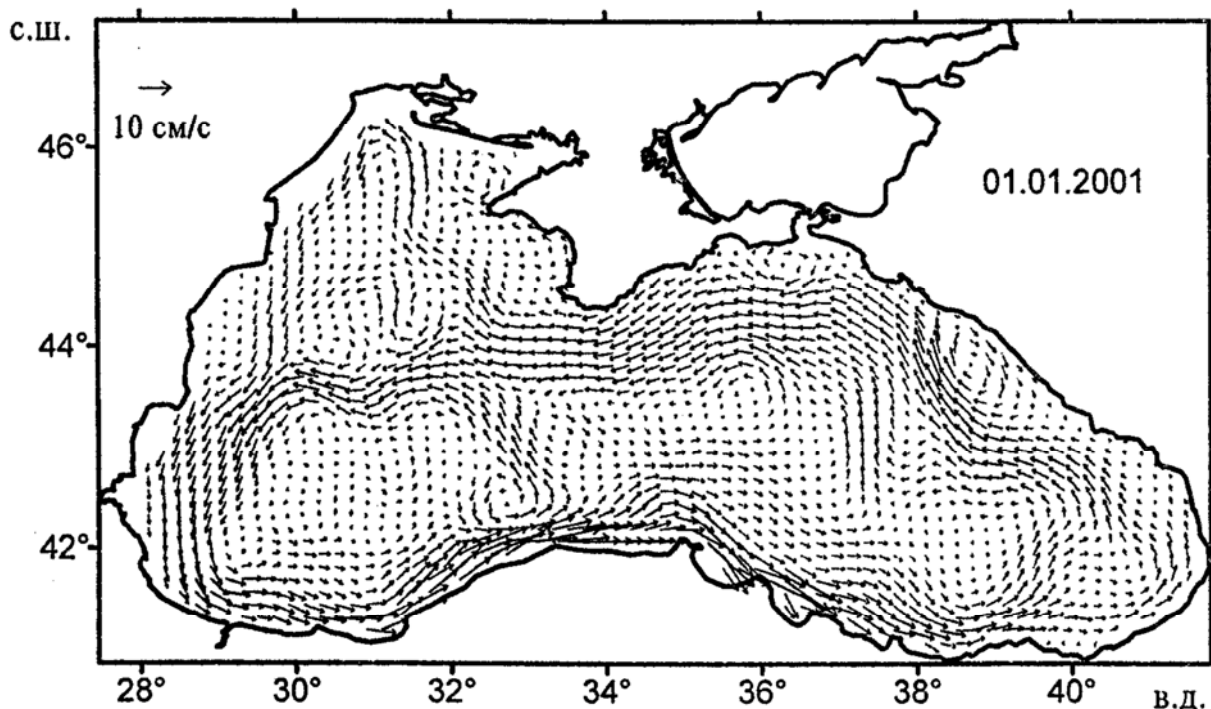
Опыт мониторинга циркуляции Черного моря. Дорогостоящая наблюдательная океанографическая система, поддерживавшаяся Советским Союзом и дававшая более 50 % общего объема океанографических данных в мировом масштабе, едва ли может быть восстановлена на Черном море вследствие ее экономической неэффективности. Поэтому актуальной задачей является воссоздание системы постоянного контроля состояния Черного моря на новом технологическом уровне. Как следует из содержания предыдущих разделов, дистанционные наблюдения с ИСЗ и применение спутников как ретрансляторов обеспечивают необходимый набор наблюдений, позволяющий осуществлять мониторинг морской динамики. При этом существенным элементом системы мониторинга является модель циркуляции вод, использующая часть спутниковых измерений в качестве граничных условий и ассимилирующая оставшиеся данные наблюдения. Опыт реализации системы мониторинга циркуляции Черного моря на основе спутниковых наблюдений показывает, что наиболее важным наблюдательным компонентом для достоверного воспроизведения мезомасштабных структур циркуляции является альтиметрия. Усвоение альтиметрических данных в численных моделях циркуляции моря позволяет воспроизводить непрерывную динамику мезомасштабных структур и с приемлемой точностью описывать трехмерные поля температуры, солёности и течений.

Продemonстрируем далее эффективность усвоения альтиметрических данных измерений динамического уровня, полученных со спутников *ERS-1* и *TOPEX/POSEIDON*, в численной модели общей циркуляции Черного моря при восстановлении горизонтальной и вертикальной структуры гидрологических параметров. Используемая здесь модель подробно описана в работах [1, 2]. Модель адаптирована к физико-географическим условиям Черного моря. Разрешение по пространству в зональном и меридиональном направлениях составляло 7 км. По вертикали модель имела 33 неравномерно расположенных горизонта. Коэффициенты вертикального турбулентного обмена теплом и солью задавались переменными по глубине. Черное море рассматривалось как замкнутый бассейн, т. е. влиянием Босфора и стока рек мы пренебрегали.

Алгоритм усвоения данных альтиметрических измерений в модели общей циркуляции основан на методологии фильтра Калмана. Методология ассимиляции данных измерений уровня обоснована в серии численных экспериментов [3]. В этих экспериментах показано, что при ассимиляции данных об уровне наиболее эффективным является внесение коррекции с помощью наблюдений не в уравнения движения, а в уравнения баланса тепла и соли. Это связано с тем, что динамический уровень моря отражает в интегральном виде структуру бароклинной циркуляции.

На поверхности моря были заданы: напряжение трения ветра, потоки тепла и климатическая соленость. В расчетах использовались ежесуточные поля напряжений трения ветра, полученные по синоптическим картам 1992 – 2000 гг. В качестве начальных полей были приняты климатические массивы, рассчитанные для каждого месяца. Ассимилировались альтиметрические данные измерений уровня со спутников *TOPEX/POSEIDON* (09.1992 – 08.1999), *ERS-1* (стадия C: 04.1992 – 12.1993, стадия G: 03.1995 – 06.1996) и *ERS-2* (05.1995 – 12.2000).

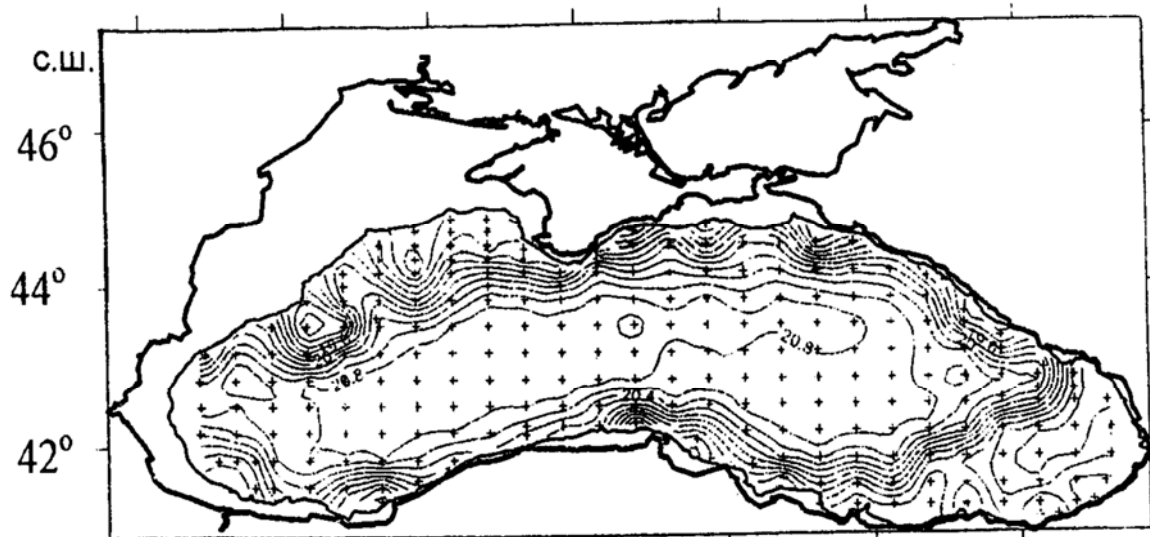
В результате расчетов с ассимиляцией спутниковых измерений получена непрерывная эволюция трехмерных полей температуры, солености и скорости течений почти за девять лет. Представление о характере воспроизводимой циркуляции дает рис. 2, показывающий картину поверхностных течений в Черном море в конце интегрирования. Легко убедиться, что на рисунке видны все характерные особенности поверхностной циркуляции Черного моря. Интенсивное Основное Черноморское течение наблюдается вдоль побережья и вдоль свала глубин на окраине северо-западного шельфа. Скорость течений в его струе достигает 25 – 30 см/с, что хорошо согласуется с данными наблюдений. Видны также два круговорота в западной и восточной частях бассейна, образующие «Очки Книпповича». На периферии течения наблюдаются мезомасштабные вихри в юго-восточном районе бассейна, вдоль Кавказского побережья и на северо-западном шельфе.



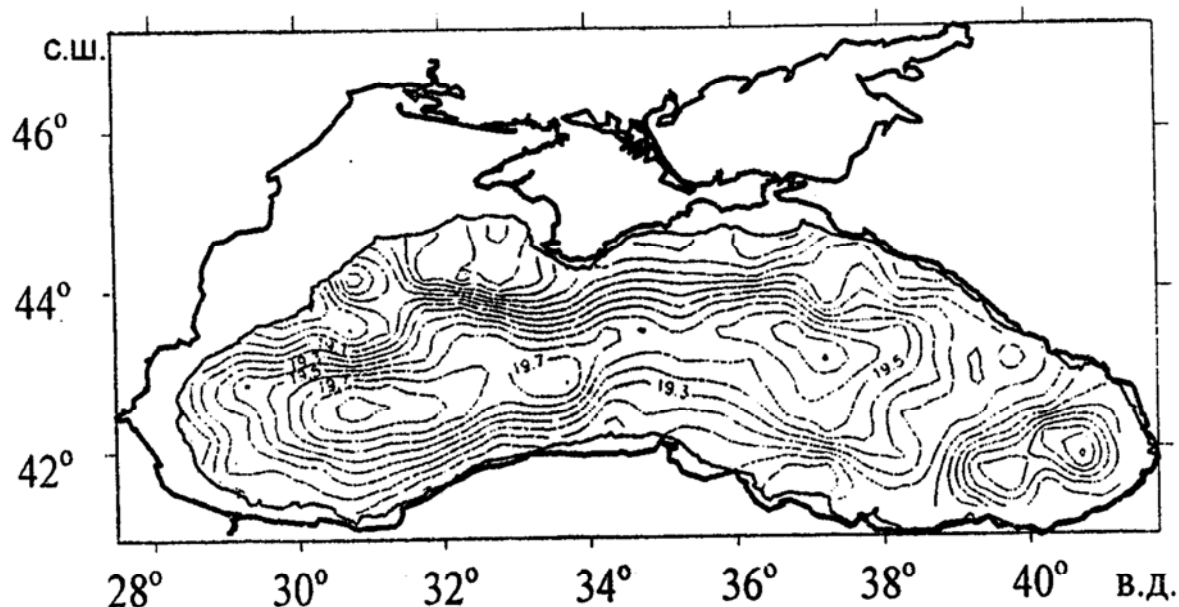
Р и с. 2. Поверхностная циркуляция в Черном море, полученная по результатам ассимиляции данных альтиметров спутников *TOPEX/POSEIDON* и *ERS* в численной модели

Эффективность расчетов трехмерной гидрологической структуры Черного моря с усвоением альтиметрических данных измерений уровня в численной модели циркуляции удастся оценить посредством сопоставления результатов расчетов с измерениями температуры и солености, выполненными во время съемок *ComSBlack*.

На рис. 3 представлены распределения солёности на глубине 100 м, построенные в результате ассимиляции альтиметрических измерений и по данным съёмки *ComSBlack'92* (положения станций съёмки *ComSBlack'92* показаны на рис. 3, а). Распределения солёности, полученные по данным гидрологических измерений во время съёмки *ComSBlack* и в результате усвоения данных спутниковой альтиметрии, хорошо коррелируют между собой и отражают основные особенности общей циркуляции Чёрного моря.



а



б

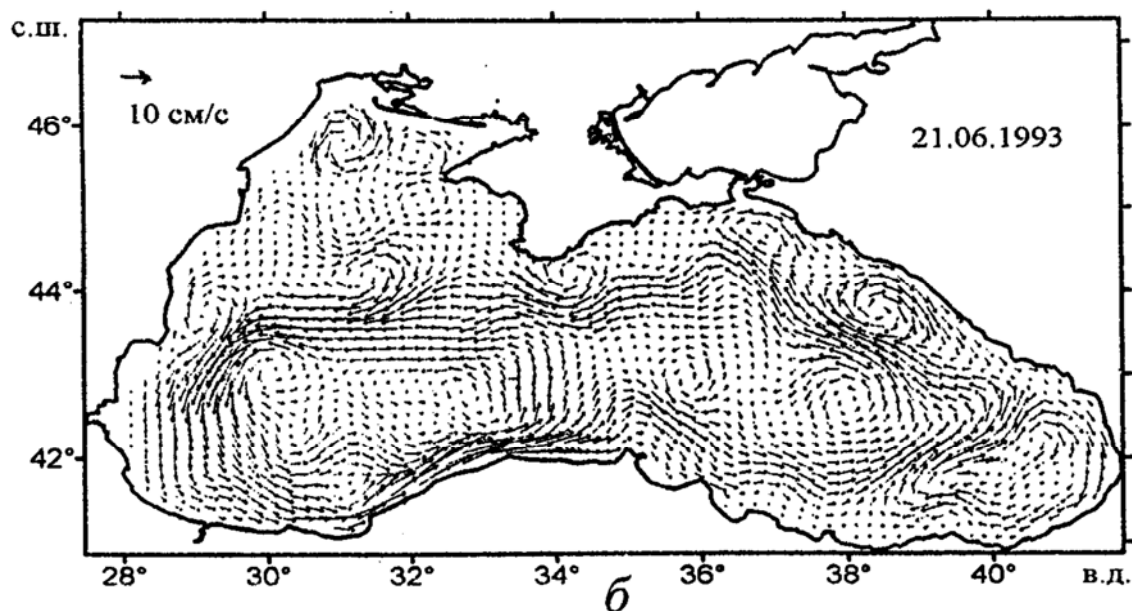
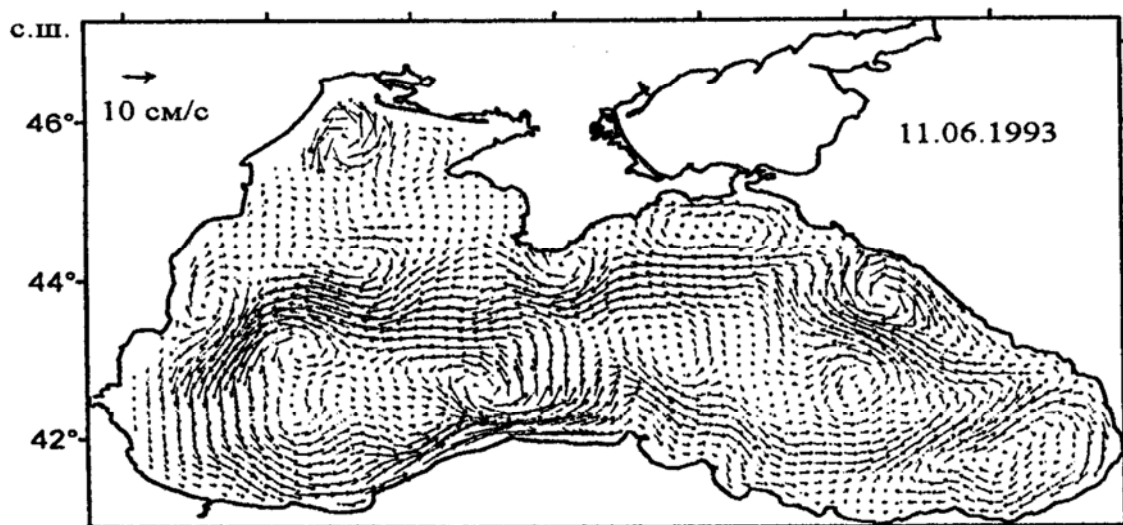
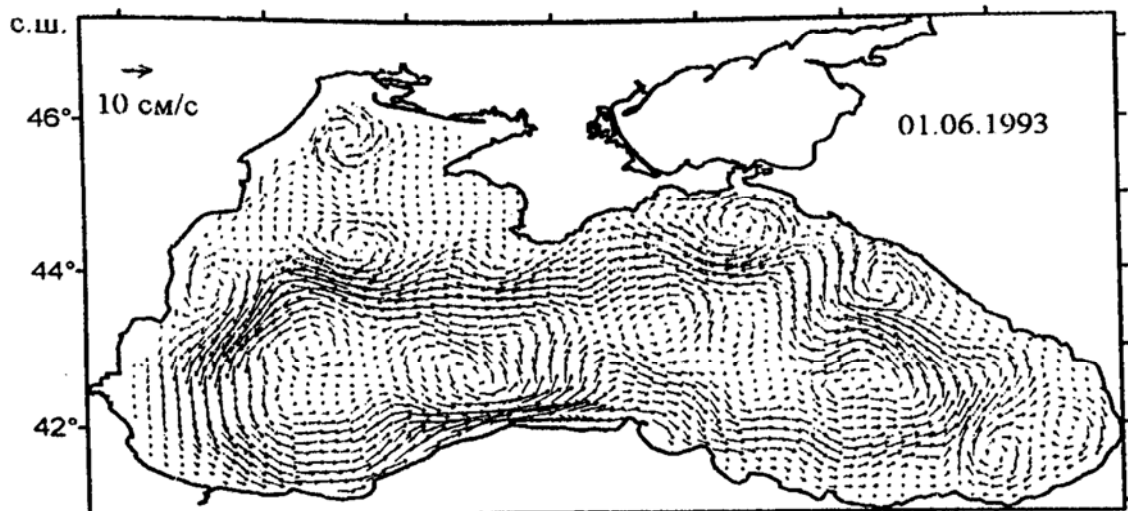
Р и с. 3. Распределение солёности (‰) на глубине 100 м по данным гидрологической съёмки (а) и в результате ассимиляции данных альтиметрических измерений (б)

Эффективность воспроизведения поверхностных течений в море по данным ассимиляции спутниковых альтиметрических измерений демонстрирует рис. 4. На рис. 4, *а* приведено изображение Черного моря в видимом диапазоне спектра электромагнитных волн. Обращает внимание аномальное распространение мутных вод от устья Дуная в направлении Крыма (обычно воды Дуная переносятся на юг вдоль побережья). Восстановленные в результате расчетов поверхностные течения (рис. 4, *б*) позволяют объяснить аномальный перенос мутных вод действием пары вихрей. Южный антициклонический вихрь также является причиной формирования спиральной нитевидной структуры, хорошо видной на рис. 4, *а*.

В целом опыт работы с данными спутниковых измерений показывает достоверность и исключительную ценность альтиметрической информации для текущего контроля циркуляции в Черном море. Однако следует отметить, что наилучшая корреляция гидрологических и рассчитанных данных наблюдается в главном пикноклине. Это означает, что посредством ассимиляции данных альтиметрии удастся с хорошей точностью восстанавливать лишь низшую моду колебаний пикноклина, и дальнейшее совершенствование диагноза и прогноза возможно при использовании дополнительных измерений вертикальных распределений температуры и солености, обеспечиваемых буями-профилемерами.



а



Р и с. 4. Изображение Черного моря в видимом участке спектра электромагнитных волн (снимок любезно предоставлен С.В. Станичным) (а) и поверхностные течения в море, рассчитанные в результате ассимиляции данных альтиметрических измерений (б)

Таким образом, ассимиляция данных альтиметрии и наблюдений ветра в модели циркуляции Черного моря, реализованной к настоящему времени, позволяет надежно восстанавливать течения в верхнем слое моря и топографию главного пикноклина. Ассимиляция данных ИК-радиометрии и буев-профиломеров позволит более надежно воспроизводить термодинамику верхнего слоя моря и контролировать межгодовую изменчивость температурной и халинной стратификации бассейна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демышев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке *C* // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. — М.: ИВМ РАН, 1992. — С. 163 – 231.
2. Дорофеев В.Л., Демышев С.Г., Коротаев Г.К. Вихреразрешающая модель циркуляции Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2001. — С. 71 – 82.
3. Коротаев Г.К., Саенко О.А., Коблински Ч.Дж. и др. Точность, методология и некоторые результаты ассимиляции альтиметрических данных *TOPEX/POSEIDON* в модели общей циркуляции Черного моря // Исследование Земли из космоса. — 1998. — № 3. — С. 3 – 17.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 04.02.03

ABSTRACT The paper reviews principles and methods of the ocean satellite monitoring and analyzes the perspectives of application of satellite measurements for operative analysis and prognosis of the Black Sea circulation. Discussed are physical foundations of remote sensing, possibilities of present instrument complexes for observing the sea surface from ES, and also application of ES as a relay of measurement data from free drifting buoys. Modern oceanographic studies from ES permit to use the obtained data for the numerical calculation of currents in seas and oceans in the model of general circulation as well as for the development of the system of operative diagnosis and prognosis of marine environment state. Examples of the experimental realization of the elements of the system of the Black Sea operative diagnosis based on ES application are presented. Perspectives of the prognosis of currents in the basin are estimated.