

Ю.Б. Ратнер, Д.М. Соловьев, Е.И. Калинин

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь***СОПОСТАВЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
ЧЕРНОГО МОРЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ДАННЫМ АППАРАТУРЫ AVHRR-3
ИСЗ NOAA И SVP-ДРИФТЕРОВ В МАРТЕ-АВГУСТЕ 2003 Г.**

В работе дана оценка точности восстановления температуры поверхности (ТПМ) Черного моря по данным аппаратуры AVHRR-3 ИСЗ NOAA, принятым в центре обработки спутниковой информации МГИ НАН Украины и используемым для усвоения в гидродинамической модели. С этой целью привлечены измерения SVP - дрифтеров, полученные в ходе специализированного дрифтерного эксперимента в 2003 г. При решении поставленной задачи большое внимание уделяется решению проблем, связанных с пространственно-временной рассогласованностью спутниковых и дрифтерных измерений и наличием других помех в спутниковых и контактных ТПМ. Полученные результаты в дальнейшем планируется использовать для совершенствования процедур расчета и ассимиляции спутниковых ТПМ в гидродинамической модели.

Введение. Мониторинг Черного моря относится к числу актуальных задач, представляющих интерес как для Украины, так и для развития сотрудничества в этом направлении с другими европейскими странами. Решение этой задачи обеспечит контроль экологической безопасности Черного моря, более рациональное использование биологических ресурсов Черноморского бассейна, лучшее обоснование инженерных решений при проектировании морских сегментов систем коммуникации, транспортировки и добычи минеральных ресурсов. С этой целью в Морском гидрофизическом институте (МГИ) НАН Украины разработана достаточно подробная гидродинамическая модель циркуляции Черного моря [1].

В настоящее время расчеты по этой модели ведутся в режиме, близком к оперативному [2]. К числу важных направлений дальнейшего совершенствования этой модели относится оперативное усвоение дополнительной метеорологической и гидрологической информации, поступающей из различных источников и, прежде всего, с ИСЗ. Важнейшим примером таких данных является уровень морской поверхности, восстанавливаемый по альтиметрическим измерениям спутников *TOPEX/POSEIDON*, *Jason-1*, *ERS-2* и др. [3]. Другим примером может служить ассимиляция данных о поле температуры поверхностной моря (ТПМ), восстанавливаемой по дистанционным измерениям в инфракрасном (ИК-) диапазоне [4].

Для разработки, реализации и совершенствования процедуры ассимиляции поля поверхностной температуры необходимы оценки точности поступающей спутниковой информации о ТПМ в режиме максимально близком к режиму реального времени. Для этого требуется привлечение контактных измерений ТПМ в достаточно большом (но все же ограниченном)

числе точек морской акватории. Наиболее распространенным и доступным инструментальным средством для выполнения этих измерений в настоящее время являются дрейфтеры [5].

1. Методические проблемы сопоставления спутниковых и контактных данных. При сопоставлении спутниковых ТПМ с данными дрейфтеров возникает ряд общих проблем, которые изучались на протяжении последних четырех десятилетий и продолжают изучаться в настоящее время. К их числу относится пространственно-временная рассогласованность спутниковых и контактных данных, возникающая из-за различия физических принципов измерений [6 – 8], наличие различий между дистанционными ТПМ, полученными с различных спутниковых платформ [9], влияние ошибок распознавания облачных ситуаций и сбоев в информации при восстановлении ТПМ по спутниковым данным [9], а также погрешностей контактных измерений [5, 8]. Кроме того, имеют место погрешности статистических методов оценивания точности, в особенности в условиях малых объемов выборок совместных измерений ТПМ [10]. Здесь мы подробнее остановимся на помехах, связанных с пространственно-временной рассогласованностью дистанционных и контактных измерений, другие будут рассмотрены по ходу дальнейшего изложения.

Эффекты пространственно-временной рассогласованности измерений возникают из-за несинхронности дистанционной и контактной съемки, пространственной несовместимости поля зрения ИК-радиометра и точки локализации дрейфтера, конечных размеров элемента разрешения радиометра по сравнению с «точечными» у дрейфтеров, разности эффективной глубины измерений для спутниковых ТПМ и глубины на которой выполняются контактные измерения.

Некоторые из этих помех поддаются частичному контролю и устранению – речь здесь идет, прежде всего, о временной несинхронности и пространственной несовместимости измерений по горизонтали. Система сбора данных измерений дрейфтеров ARGOS размещена на спутнике NOAA и сбор информации происходит в моменты, когда спутник находится в зоне прямой видимости дрейфтера [5]. В результате влияние временной несинхронности измерений может быть значительно уменьшено. Точно также горизонтальная пространственная рассогласованность измерений в лучшем случае не будет превышать пол пикселя карты спутниковой ТПМ, что составляет ~ 500 – 600 м. Это будет иметь место при условии точной географической привязки спутниковых снимков и дрейфтеров. Ошибки географической привязки могут привести к увеличению этого расстояния в 2 – 4 раза. Поэтому эффекты горизонтальной неоднородности могут оказывать влияние на получаемые оценки точности, особенно в областях, занятых мезомасштабными температурными фронтами. Такие области мы будем исключать из рассмотрения, путем отбраковки данных, для которых в 7×7 пиксельной окрестности выбранного дрейфтера, среднеквадратичная вариация спутниковых ТПМ – $\sigma_{\delta T}$, оцененная по 49 пикселям превышает $0,4^\circ\text{C}$. Остаточное влияние горизонтальной неоднородности можно оценить, зная структурную функцию поля поверхностной температуры вне областей, занятых температурными фронтами, что мы и попытаемся сделать в настоящей работе.

Различия в спутниковых и контактных измерениях ТПМ, возникающие из-за разницы эффективной глубины спутниковых (до 100 мкм) и контактных измерений (0,2 – 1) м, практически не поддаются контролю современными инструментальными средствами в оперативном режиме, так как они связаны с тонкими физическими механизмами формирования вертикального профиля температуры в приповерхностном слое моря [6, 7], требующими сложной аппаратуры для их наблюдения и измерения. В этих работах и многих других, показано, что в условиях слабых ветров, меньших 3 – 6 м/с, в приповерхностном слое моря толщиной до 1 – 10 м могут возникать большие вертикальные градиенты температуры. Именно они и приводят к существенным отличиям между измерениями дрейфтеров и спутниковыми ТПМ. Исходя из этого в работе [8] предложена новая стратегия оценки точности спутниковых ТПМ. В соответствии с ней контактные измерения, и, в частности дрейфтерные, предлагается использовать для сопоставления в условиях средних и сильных ветров – $V \geq 3 \div 6$ м/с, при слабых ветрах предлагается использовать специализированные прецизионные ИК-радиометры, работающие в автоматическом режиме и устанавливаемые на различные платформы – проходящие суда и заякоренные буи [8].

Как представляется, в случае решения ряда методических проблем, связанных с выполнением прецизионных наземных ИК-измерений, эта комплексная стратегия позволит получить наиболее адекватные оценки точности восстановления ТПМ по спутниковым данным. Но, учитывая наши ограниченные возможности, задачами настоящей работы является практическая оценка качества конкретного информационного продукта, получаемого центром обработки спутниковых данных МГИ НАН Украины на основе имеющейся в нашем распоряжении контактной информации, а также выбор рациональной схемы квазиоперативной оценки точности спутниковых ТПМ на основе накопленного мирового опыта решения этой задачи.

2. Данные. С целью оценки точности спутниковых ТПМ были использованы данные дрейфтерных измерений в Черном море, выполнявшиеся в период с 12 марта по 11 августа 2003 г.

Спутниковые измерения приповерхностной температуры. Поля ТПМ рассчитывались по данным дистанционных измерений спутников NOAA-16 и NOAA-17, принятым на станции приема МГИ НАН Украины в режиме HRPT. Восстановление ТПМ осуществлялось с помощью программного обеспечения приема и обработки спутниковой информации ИСЗ NOAA, разработанного в отделе дистанционных методов исследований МГИ. Температура поверхности моря по дистанционным измерениям рассчитывалась в соответствии с алгоритмом MCSST [11], параметры которого для разных спутников оперативно корректировались в соответствии с данными NOAA, предоставляемыми на сайте www.ncdc.noaa.gov. Отличительной особенностью расчетов было использование собственных, частично интерактивных алгоритмов фильтрации облачности. Это было сделано с целью сохранения участков акватории моря, занятых апвеллингами и другими динамически значимыми процессами, которые отфильтровываются стандартными алгоритмами, описанными в литературных источниках [9]. Однако в настоящее время наши собственные алгоритмы нуждаются в дополнительной доработке и тестировании, которое будет частично выполнено в настоящей работе.

Всего за период с 12 марта по 11 августа 2003 г. было получено 458 карт ТПМ. Максимальное количество карт, приходящихся на 1 день – четыре, минимальное – ни одной. Размер элемента разрешения карты спутниковой ТПМ $\sim 1,1$ км.

Контактные измерения приповерхностной температуры. Для сопоставления со спутниковыми ТПМ были использованы данные дрейфтерных измерений. Для этой цели применялись SVP-дрейфтеры, разработанные в рамках программы WOCE фирмой «Марлин-Юг» (г. Севастополь). Датчик приповерхностной температуры у этих дрейфтеров расположен на глубине 0,2 – 0,25 м от поверхности моря. Флуктуационная погрешность измерений температуры морской воды не превышает $\sim 0,02^\circ\text{C}$, шумы квантования $\sim 0,12^\circ\text{C}$. Сбор данных, их географическая привязка и передача в центры обработки осуществляется с помощью системы ARGOS, установленной на ИСЗ NOAA [5].

Всего за период со второй декады марта по первую декаду августа были доступны измерения с 10 дрейфтеров, однако из-за сбоев в работе аппаратуры реально можно было использовать данные только 7. Полный объем данных составляет 12 632 измерения. Траектории движения дрейфтеров за указанный период времени показаны на рис. 1. Они охватывают преимущественно западную часть акватории Черного моря.

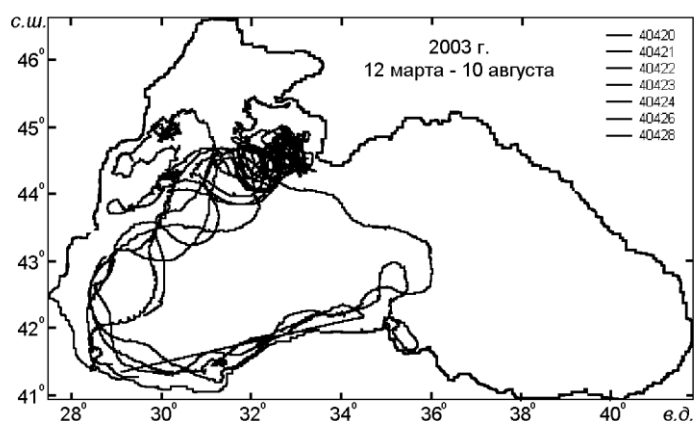


Рис. 1. Траектории движения дрейфтеров в Черном море.

Обеспеченность совместными спутниковыми и контактными измерениями ТПМ. Распределение разностей времен регистрации контактных и спутниковых ТПМ зависит от номера спутника. Для ИСЗ NOAA-16 оно имеет многомодовую структуру, с максимумами, локализующимися в окрестности величин, примерно кратных периоду обращения этого спутника. На рис. 2, а показан фрагмент гистограммы разностей времен регистрации спутниковых карт ТПМ ИСЗ NOAA-16 и контактных данных в интервале ± 180 минут с шагом 1 минута. Особенностью распределения разности времен является наличие 3-х минутного сдвига между временем регистрации спутниковых и контактных данных. Возможная причина сдвига в сторону отрицательных значений состоит в том, что спутниковой карте ТПМ приписывается время,

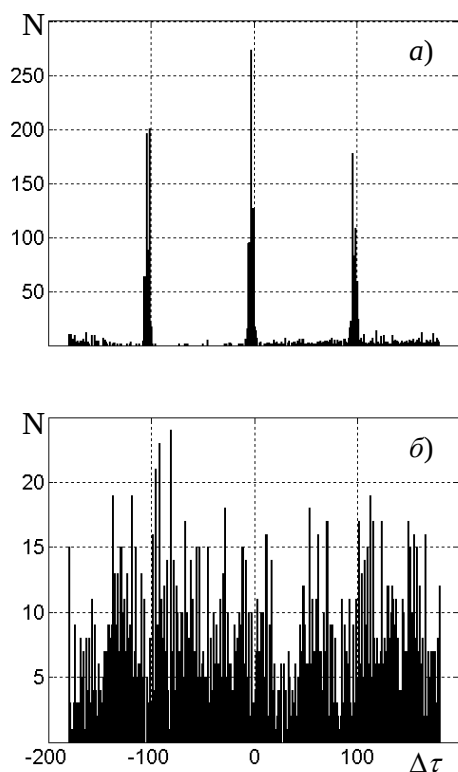


Рис.2. Гистограммы распределения разности времен спутниковых и контактных ТПМ: ИСЗ NOAA-16 (а); ИСЗ NOAA-17 (б).

Нас, естественно, интересуют совместные измерения с наименьшими по абсолютной величине разностями времен. Для спутника NOAA-16 приемлемым вариантом является выбор измерений с разностью времен регистрации из интервала ± 6 минут. Всего таких совместных измерений – 793. При таком их выборе, изменениями ТПМ, обусловленными ее временной изменчивостью можно пренебречь. Для спутника NOAA-17 временной интервал для разности времен регистрации приходится выбирать более широким. Предельно допустимая величина разности времени регистрации не должна быть больше ± 30 минут, иначе начнет сказываться временная изменчивость ТПМ. Если ограничиться этим интервалом, то число таких совместных измерений будет равно 330, что примерно в 2 раза меньше, чем для спутника NOAA-16 при ± 6 минутном допуске на несинхронность спутниковых и контактных ТПМ. Такие различия приводят к определенным трудностям одновременного оценивания точности дистанционных ТПМ для обоих спутников. Поэтому сначала следует получить оценки для каждого спутника по отдельности, а затем решить вопрос о целесообразности оценивания точности всех спутниковых ТПМ в целом.

Пространственное рассогласование между спутниковыми ТПМ и данными дрейфтеров, ограничим полупикселем спутниковой карты, что соот-

ответствующее началу приема дистанционных измерений, а опрос дрейфтеров происходит несколько позже, когда спутник пролетает на минимальном расстоянии от точек их локализации. Наибольшее число квазисинхронных совместных измерений времен сосредоточено вблизи $\Delta\tau = -3$ мин. По этой причине, для упрощения последующего анализа данных NOAA-16, мы будем из времени спутниковой карты вычитать этот сдвиг и в дальнейшем под разностью времен будем подразумевать величины, сдвинутые на $\Delta\tau$.

Для ИСЗ NOAA-17 распределение разностей времен регистрации спутниковых и контактных ТПМ показано на рис. 2, б. Оно гораздо более размыто по сравнению со спутником NOAA-16. Какие-либо регулярные сдвиги между временами спутниковых и контактных измерений в этом случае не обнаруживаются.

ветствует 500 – 600 метрам. При этом следует иметь в виду, что часть пикселей, удовлетворяющих этому критерию, будет затем отфильтрована по критериям наличия облачности и температурных фронтов. Поэтому окончательное число совместных измерений может оказаться меньше приведенных выше значений, полученных только с учетом отбора данных по времени.

3. Первичная статистическая оценка точности спутниковых ТПМ на основе сопоставления с данными дрейфтеров. Для получения первичной статистической оценки точности спутниковых ТПМ были по отдельности сформированы массивы совместных спутниковых и контактных измерений для ИСЗ NOAA-16 и NOAA-17. Для спутника NOAA-16 после фильтрации облачности и температурных фронтов, полный объем сформированного массива данных составил 289 совместных измерений. Для спутника NOAA-17 после выполнения аналогичных операций, полный объем сформированного массива составил 119 совместных измерений. Кроме спутниковой и контактной ТПМ в массивы была включена информация о скорости ветра, полученная по одноградусным данным реанализа NCEP, ежедневно в сроки 0, 6, 12 и 18 часов UTC и проинтерполированная по времени на моменты контактной съемки ТПМ и пространству на точки локализации дрейфтеров.

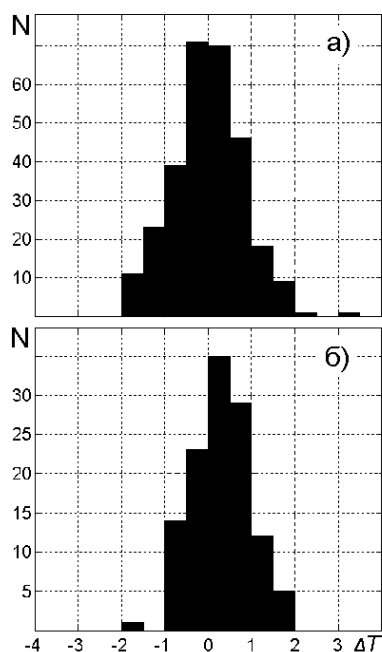


Рис.3. Гистограммы распределения отклонений $-\Delta T$, между спутниковыми и контактными ТПМ:
а) ИСЗ NOAA-16; б) ИСЗ NOAA-17.

Гистограмма отклонений между спутниковыми и контактными ТПМ для спутников NOAA-16 показана на рис. 3 а. Величина среднего отклонения составила $\mu_{16} = 0,01^\circ\text{C}$, среднеквадратичного – $\sigma_{16} = 0,82^\circ\text{C}$. Среднеквадратичное отклонение оказалась достаточно большим по сравнению с ожидаемой величиной – $0,6 - 0,7^\circ\text{C}$. Гистограмма слегка асимметрична и имеет одно anomalous отклонение. После его удаления полученные оценки среднего и среднеквадратичного отклонения уменьшились соответственно на $0,01$ и $0,02^\circ\text{C}$.

Гистограмма отклонений между спутниковыми ТПМ, восстановленными по данным ИСЗ NOAA-17 и измерениями дрейфтеров, показана на рис. 3 б. Величина среднего отклонения составила $\mu_{17} = 0,32^\circ\text{C}$, среднеквадратичного – $\sigma_{17} = 0,66^\circ\text{C}$. Среднеквадратичное отклонение соответствует ожидаемым величинам, но систематическое смещение спутниковых ТПМ относительно контактных данных достаточно велико.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что отклонения спутниковых ТПМ, восстановленных по данным разных ИСЗ имеют различную

природу. В первом случае отклонения могут рассматриваться как чисто случайные, во втором – достаточно заметна роль систематической составляющей отклонений. В случае устранения систематического смещения, точность спутниковых ТПМ, восстановленных по данным спутника NOAA-17 оказывается выше, чем по данным NOAA-16.

Ограничим приведенными результатами первичный статистический анализ отклонений между спутниковыми и контактными ТПМ. Дальнейшие усилия сосредоточим на изучении причин их появления.

4. Влияние помех на отклонения между спутниковыми и контактными ТПМ. Продолжая анализировать полученные результаты, нам хотелось бы более детально изучить зависимость отклонений спутниковых и контактных ТПМ от влияния различных помех, уже упоминавшихся нами в части 1 статьи.

Первый шаг в этом направлении состоит в изучении различий между отклонениями спутниковых ТПМ, полученными в ночных и дневных условиях. Дело в том, что с одной стороны, в ночных условиях отсутствует прогрев приповерхностного слоя воды солнечным излучением, вследствие чего распределение температуры в нем может быть более равномерным по глубине и горизонтали, а с другой стороны, ночью труднее распознавать облачность, вследствие чего оказывается выше процент ошибок ее классификации, что приводит к увеличению ошибок в спутниковых ТПМ.

Статистический анализ зависимости отклонений между спутниковыми и контактными ТПМ от времени суток. Разобьем каждую из имеющихся выборок совместных измерений на две подвыборки – ночную и дневную. Для спутника NOAA-16 дневные карты получены преимущественно с 10 до 12 часов по Гринвичу, ночные – с 23 до 1 часа по Гринвичу. Для ИСЗ NOAA-17 время дневных карт распределено между 7 и 9 часами по Гринвичу, ночных – между 18 и 20 часами. Оценим для каждой из полученных четырех подвыборок систематическое смещение и среднеквадратичное отклонение. Эти оценки приведены в табл. 1. В этой же таблице даны также оценки и для двух исходных выборок (0 – 24 часа), приведенные выше в части 3 статьи.

Таблица 1. Статистические характеристики отклонений между спутниковыми и контактными ТПМ в зависимости от времени суток.

Спутник	Время суток, час	N	μ	σ	μ_V	σ_V
NOAA-16	00 – 24	289	0,01	0,82	4,2	2,2
	10 – 12	159	0,27	0,72	4,4	2,0
	23 – 01	130	– 0,30	0,83	3,9	2,3
NOAA-17	00 – 24	119	0,32	0,66	4,2	2,1
	07 – 09	82	0,36	0,65	4,1	2,2
	18 – 20	37	0,22	0,69	4,4	1,8

Общие черты поведения оценок систематического смещения – μ в зависимости от времени суток состоят в том, что при переходе от дневного

времени к ночному его величина уменьшается. Для среднеквадратичного отклонения – σ , наблюдается обратная картина – для дневных ТПМ оно меньше, чем для ночных. В то же время амплитуда изменений μ и σ для ИСЗ NOAA-17 намного меньше, чем для NOAA-16. Кроме того, для NOAA-16 систематическое отклонение меняет знак при переходе от дня к ночи, а для NOAA-17 оно хотя и убывает по величине, но знака не меняет. Полученные результаты допускают следующую интерпретацию.

Более слабая изменчивость статистических характеристик отклонений между спутниковыми и контактными ТПМ для ИСЗ NOAA-17 может быть связана с более высоким качеством ИК-радиометра, установленного на спутнике NOAA-17. Наличие заметного систематического смещения в этих данных может быть вызвано неточностями в оценках параметров алгоритма восстановления ТПМ [11], возникших из-за отсутствия достаточной статистической обеспеченности при их оценивании и калибровке. Это предположение связано с тем, что к первому полугодию 2003 г. спутник NOAA-17 еще сравнительно мало времени функционировал на орбите. Еще одна причина может заключаться в том, что фактически для NOAA-17 в летнее полугодие измерения выполняются не строго в ночное, а в вечернее время, в условиях частичного солнечного освещения, что позволяет лучше отфильтровать облачность, чем для NOAA-16, где измерения выполняются глубокой ночью.

Среднеквадратичное отклонение при переходе от дневного времени к ночному может увеличиваться из-за увеличения разброса в радиационных температурах, вызванного большей долей не распознанной облачности в ночные часы. Так как температура облачности в среднем ниже, чем температура водной поверхности, то этим же эффектом может отчасти объясняться и уменьшение систематического отклонения. Однако, систематическое отклонение может изменяться также из-за влияния дневного прогрева верхнего слоя моря и наличия холодной пленки в верхнем 10 – 100 мкм слое воды. В ночное время прогрев верхнего слоя моря отсутствует и остается влияние только холодной пленки – это как раз и может приводить к отмечаемой изменчивости μ .

Влияние прогрева верхнего слоя моря и холодной пленки зависит от множества факторов. Одним из ведущих среди них является ветер, регулирующий интенсивность дневного прогрева и устойчивость холодной пленки на поверхности моря [6, 7]. При наличии данных о ветре можно попытаться разделить влияние облачности и вертикальной неоднородности приповерхностной температуры на отклонения между спутниковыми и контактными ТПМ. Ниже нами предпринимается попытка решения этой задачи.

Исследование зависимости отклонений между спутниковыми ТПМ и измерениями дрейфтеров от скорости приповерхностного ветра. Для того, чтобы проанализировать изучаемый эффект нам необходимы вместе с контактными измерениями ТПМ также и одновременные измерения скорости приповерхностного ветра. Однако, к сожалению, имеющиеся в нашем распоряжении SVP-дрейфтеры не обеспечивают этого. По этой причине информацию о ветре необходимо было брать из других источников.

В нашем распоряжении имелись данные реанализа ветра NCEP, которые и были использованы для изучения этих зависимостей. Следует отме-

титель, что даже с учетом интерполяции эти величины могут значительно, до ± 2 м/с, отличаться от истинного ветра. Поэтому все дальнейшие выводы, сделанные на основе использования таких данных, следует принимать с определенной осторожностью.

Прежде всего представляет интерес проанализировать распределение скорости ветра во всех 6 вариантах выборок данных (см. табл. 1). Соответствующие гистограммы приведены на рис. 4, *a-e*, а статистические характеристики – средний ветер – μ_V и его среднеквадратичная вариация – σ_V даны в табл. 1.

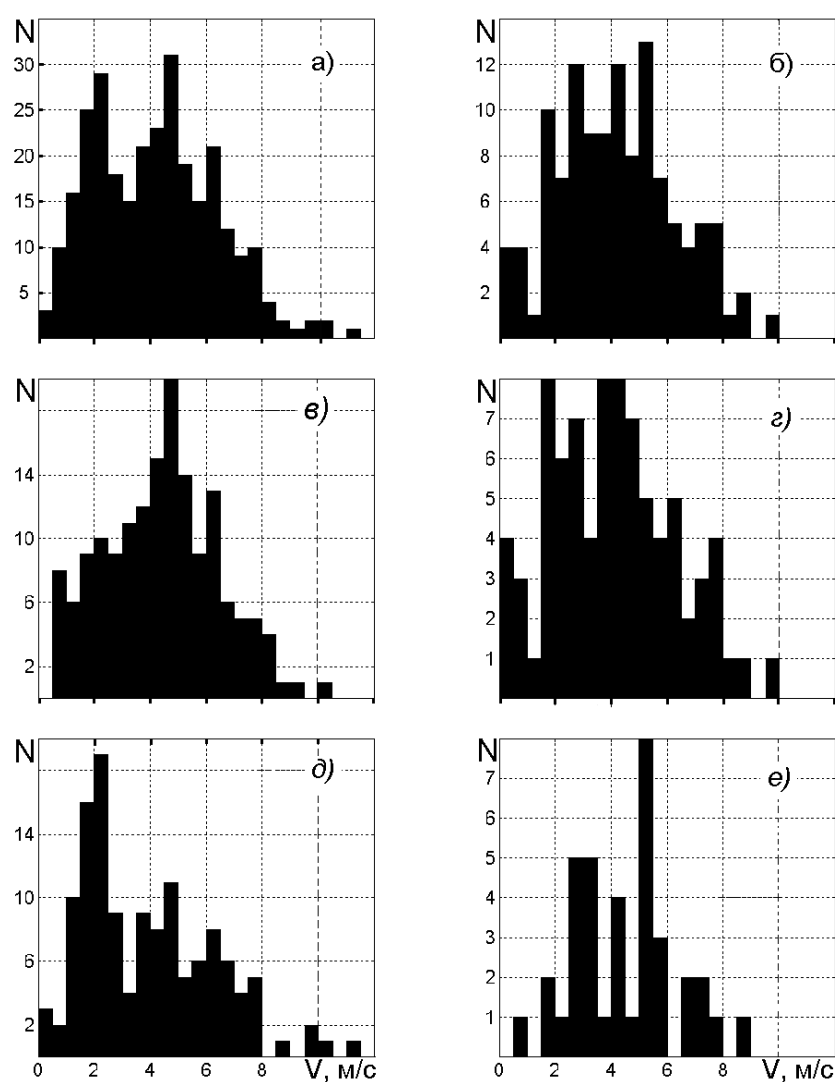


Рис. 4. Гистограммы распределения скорости ветра V для совместных измерений спутниковых и контактных ТПМ: ИСЗ NOAA-16, все измерения (*a*); ИСЗ NOAA-17, все измерения (*б*); ИСЗ NOAA-16, дневные измерения (*в*); ИСЗ NOAA-17, дневные измерения (*г*); ИСЗ NOAA-16, ночные измерения (*д*); ИСЗ NOAA-17, ночные измерения (*е*).

Из рассмотрения этих данных видно, что сопоставление спутниковых и контактных ТПМ происходит в околоштилевых ситуациях со скоростью ветра – $V \leq 3$ м/с, или в условиях слабых ветров – $3 \leq V < 6$ м/с. Именно в таких условиях эффекты вертикальной неоднородности приповерхностной температуры проявляются наиболее сильно [6]. При переходе от дня к ночи, выборки для ИСЗ NOAA-17 по величине среднего ветра более однородны, чем для NOAA-16.

Для изучения зависимости отклонений между спутниковыми и контактными ТПМ оценим регрессии этих отклонений на соответствующие им величины скорости ветра. При этом мы ограничимся выбором простой линейной функции регрессии, описываемой соотношением:

$$\Delta T(V) = \alpha_0 + \alpha_1 V, \quad (1)$$

где ΔT – отклонения между спутниковыми и контактными ТПМ, V – скорость ветра и α_i числовые коэффициенты, подлежащие определению по эмпирическим данным. Как показали наши оценки, которые мы здесь не приводим, для более сложных функций, например типа той, что предложена в [7], по имеющимся данным не удастся получить достоверные оценки параметров регрессии.

Параметры регрессии были оценены по отдельности для спутников NOAA-16 и NOAA-17, по дневным и ночным выборкам. Полученные результаты показаны на рис. 5, а – з. Точками показаны эмпирические данные, прямыми линиями – регрессии $\Delta T(V)$. Коэффициенты регрессий α_i и границы их 95 % доверительных интервалов – нижняя – $\alpha_i^{(i)}$ и верхняя $\alpha_i^{(s)}$ даны в табл. 2. Здесь также приведено среднеквадратичное отклонение остатков – $\sigma^{(v)}$. Согласно этим оценкам в трех из четырех случаев зависимость $\Delta T(V)$ может быть признана значимой с коэффициентом доверия 0,95.

Для спутника NOAA-16 характер зависимости $\Delta T(V)$ для дневной и ночной выборок качественно соответствует предположению о ведущей роли дневного прогрева и холодной пленки соответственно. Однако, согласно нашим данным, зависимость $\Delta T(V)$ для ночных условий более сильная, чем в [7]. Для спутника NOAA-17 зависимость $\Delta T(V)$, оцененная по дневной (утренней) выборке можно считать отсутствующей, а для ночной (вечерней) она примерно в 1,5 раза сильнее, чем для NOAA-16. Обнаруженные ветровые зависимости отклонений между спутниковыми и контактными ТПМ могут быть связаны не только с эффектом, обусловленным неоднородностью вертикального профиля приповерхностной температуры, но и с другими причинами [11]. Однако полное изучение этого вопроса не входит в задачи настоящей работы.

В целом корректировка ветровой зависимости отклонений между спутниковыми и контактными ТПМ приводит к уменьшению среднеквадратичного отклонения между ними в пределах 0 – 7 %.

Результаты, приведенные выше, касались изучения влияния помех, обусловленных ошибками классификации облачности и неоднородностью вертикального профиля температуры в приповерхностном слое моря. Далее мы попытаемся оценить влияние эффектов горизонтальной неоднородности на отклонения спутниковых и контактных ТПМ.

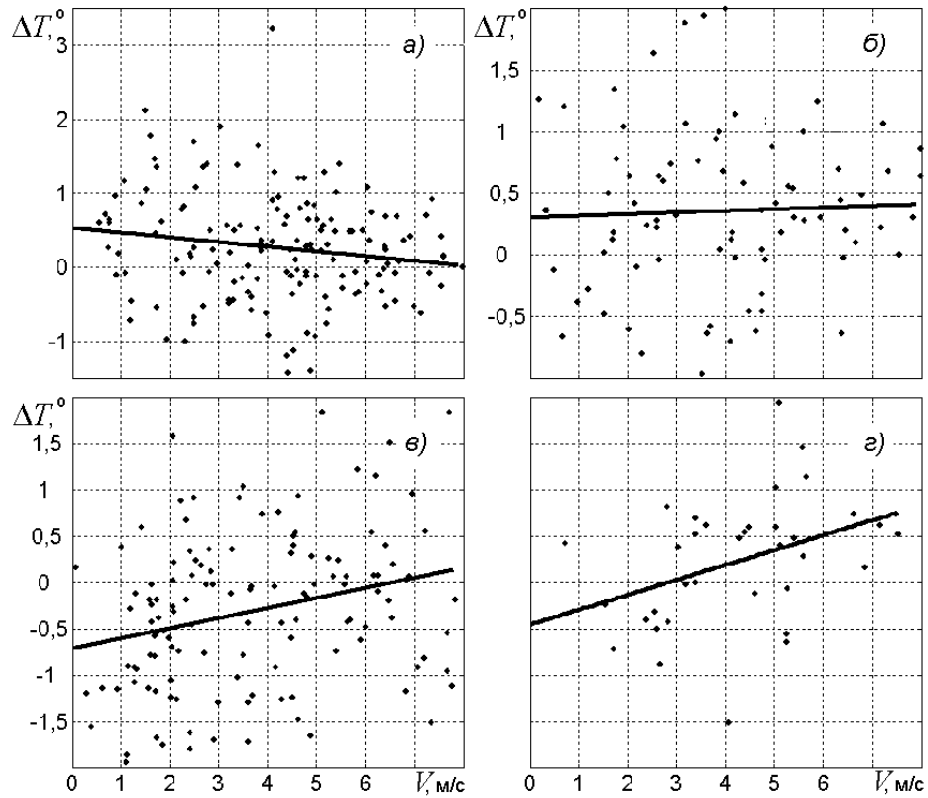


Рис. 5. Зависимость отклонений ΔT между спутниковыми и контактными ТПМ от скорости ветра V : ИСЗ NOAA-16, дневные измерения (а); ИСЗ NOAA-17, дневные измерения (б); ИСЗ NOAA-16, ночные измерения (в); ИСЗ NOAA-17, ночные измерения (г).

Таблица 2. Оценки параметров – α_i и среднеквадратичного отклонения остатков – $\sigma^{(V)}$ для регрессии $\Delta T(V)$.

Спутник	Время суток, час	α_0	$\alpha_0^{(i)}$	$\alpha_0^{(s)}$	α_1	$\alpha_1^{(i)}$	$\alpha_1^{(s)}$	$\sigma^{(V)}$
NOAA-16	10 – 12	0,53	0,24	0,82	-0,06	-0,12	-0,00	0,71
	23 – 01	-0,71	-1,00	-0,41	0,11	0,04	0,18	0,80
NOAA-17	07 – 09	0,30	-0,01	0,62	0,01	-0,06	0,08	0,65
	18 – 20	-0,46	-1,06	0,15	0,16	0,03	0,29	0,64

Оценка влияния эффектов горизонтальной неоднородности на отклонения спутниковых и контактных ТПМ. Изучение влияния эффектов горизонтальной неоднородности поля приповерхностной температуры будет основано на использовании модификации семивариограммной техники, изложенной, например, в [12]. При построении семивариограммы применительно к нашему конкретному случаю, окрестность каждой точки контактных измерений разбивалась на 10 концентрических колец с радиусами, последовательно увеличивающимися на 1 км. В каждом из этих колец отыски-

вался пиксель спутниковой карты ТПМ, ближайший к срединной окружности кольца, удовлетворяющий всем прочим ограничениям (по времени, отсутствию облачности и температурных фронтов). В результате на каждую из четырех подвыборок было сформировано по 10 новых выборок совместных измерений, стратифицированных по расстояниям – $r_i \approx 0,5; 1,5; \dots 9,5$ км пикселей карт спутниковых ТПМ от соответствующих им точек проведения контактной съемки. По каждой из полученных выборок оценивались систематическое – $\mu(r_i)$ и среднеквадратичное – $\sigma(r_i)$ отклонения. Диаграмма $\sigma^2(r_i)$ называется эмпирической семивариограммой. Она наглядно демонстрирует характер изменчивости среднеквадратичного отклонения с изменением расстояния между «точками» спутниковых и контактных измерений ТПМ. Семивариограммы для дневных и ночных ТПМ, полученных по данным спутников NOAA-16 и NOAA-17 приведены на рис. 6, а – г.

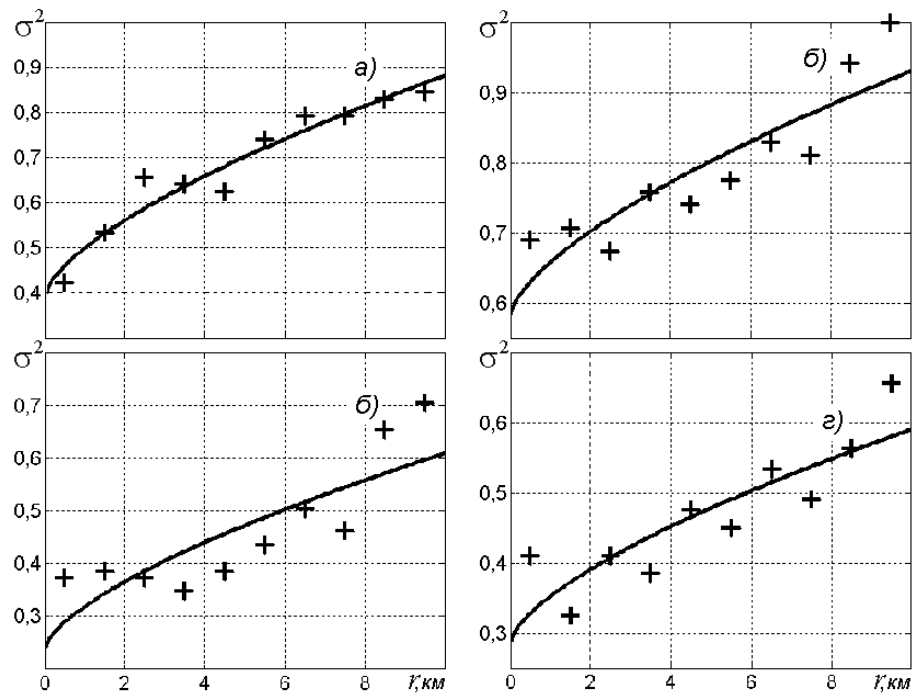


Рис.6. Зависимость среднеквадратичных отклонений – σ^2 между спутниковыми и контактными ТПМ от расстояния – r между точками спутниковой и контактной съемки: ИСЗ NOAA-16, дневные измерения (а); ИСЗ NOAA-17, дневные измерения (б); ИСЗ NOAA-16, ночные измерения (в); ИСЗ NOAA-17, ночные измерения (г).

Основываясь на анализе зависимости $\sigma(r_i)$, или теоретических соображениях, можно выбрать параметрический класс функции регрессии $\sigma(r)$ и оценить ее параметры. Тогда зависимость $\sigma(r)$ будет известна при любых r и, в частности, при $r = 0$. Величина $\sigma(0)$ может рассматриваться как оценка среднеквадратичного отклонения спутниковых ТПМ от контактных данных, скорректированная на эффекты горизонтальной неоднородности

ТПМ. При этом следует помнить, что эффекты связанные с конечностью поля зрения ИК-радиометра при определении ТПМ по спутниковым данным, остаются не скомпенсированными. Согласно [6], на расстояниях $r \approx 0,1 - 10$ км структурная функция поля приповерхностной ТПМ изменяется как $r^{2/3}$, следовательно и $\sigma^2(r)$ целесообразно параметризовать зависимостями вида:

$$\sigma^2(r) = \beta_0 + \beta_1 r^{2/3}, \quad (2)$$

где первый член формулы (2) – $\beta_0 = \sigma^2(0)$ описывает эффекты не зависящие, а второй – зависящие от расстояния.

Сопоставляя эмпирические семивариограммы с их регрессиями, принадлежащими к параметрическому классу функций (2), мы видим, что наилучшее соответствие характера изменчивости эмпирической семивариограммы и ее регрессии имеет место для дневных ТПМ, восстановленных по данным спутника NOAA-16. Для ночных ТПМ, полученных по данным спутников NOAA-16 и NOAA-17 соответствие эмпирических семивариограмм и их регрессий ухудшается. И, наконец, наиболее худшее соответствие наблюдается для дневных ТПМ, полученных по измерениям ИСЗ NOAA-17.

Относительно полученных результатов можно стать на две точки зрения. Первая состоит в том, чтобы считать причинами плохого соответствия регрессий $\sigma^2(r)$ эмпирическим данным неадекватность формулы (2) для описания эмпирических семивариограмм. Другая точка зрения состоит в том, что формула (2) справедлива, а обнаруженные несоответствия обусловлены действием ряда помех. Причинами этого могут быть, например, ошибки определения спутниковых ТПМ, связанные с мешающим влиянием не отфильтрованной облачности в ночное время, для спутника NOAA-17 еще и временная изменчивость ТПМ в дневное время суток, которая может оказаться все же значительной при временном рассогласовании между дистанционными и контактными ТПМ, равном ± 30 минут и т.д..

Мы будем придерживаться последней точки зрения, считая описание зависимости $\sigma^2(r)$ формулой (2) адекватным. Тогда можно предполагать, что полученные оценки среднеквадратичного отклонения, скорректированные на горизонтальную неоднородность – $\sigma(0)$, имеют смысл. Они приведены в табл. 3 вместе с нижними – $\sigma^{(i)}(0)$ и верхними – $\sigma^{(s)}(0)$ границами

Таблица 3. Среднеквадратичные отклонения между спутниковыми и контактными ТПМ, скорректированные на горизонтальную неоднородность приповерхностной температуры

Спутник	Время суток, час	$\sigma(0)$	$\sigma^{(i)}(0)$	$\sigma^{(s)}(0)$	$\sigma(0,1)$
NOAA-16	10 – 12	0,63	0,57	0,68	0,64
	23 – 1	0,76	0,70	0,83	0,77
NOAA-17	7 – 9	0,48	0,31	0,62	0,51
	18 – 20	0,54	0,44	0,62	0,55

95 % доверительных интервалов. Как и следовало ожидать, наиболее узкие доверительные интервалы для $\sigma(0)$ соответствуют дневным ТПМ, полученным по данным спутника NOAA-16. Для спутника NOAA-17 доверительные интервалы достаточно широки и, поэтому, полученные оценки $\sigma(0)$ вызывают у нас сомнения. В заключение следует отметить что, вообще говоря, формула (2) не адекватно описывает зависимость $\sigma^2(r)$, при $r \leq 0,1$ км, поэтому в табл. 3 мы дополнительно приводим оценку величины $\sigma(0,1)$, которая может оказаться ближе к реальности. Впрочем, согласно нашим результатам, различия между этими оценками невелики.

Основываясь на оценках, полученных для ИСЗ NOAA-16, можно ожидать, что эффекты горизонтальной неоднородности приповерхностной температуры приводят примерно к 10-ти процентному увеличению среднеквадратичного отклонения между спутниковыми и контактными ТПМ.

Изучив влияние помех на оценки статистических характеристик отклонений между спутниковыми и контактными ТПМ, можно приступить к практической оценке точности приповерхностной температуры моря, полученной по дистанционным данным. Эти вопросы рассматриваются в следующем разделе.

5. Практическая оценка точности спутниковых ТПМ. При получении практической оценки точности спутниковых ТПМ по имеющимся данным возникают две проблемы. Первая из них связана с тем, что число данных в четырех выборках совместных измерений существенно различается, а в реальности число спутниковых карт, соответствующих разным типам данных примерно одинаково. Если механически объединить эти выборки в одну, то результирующая оценка точности будет тяготеть к оценке по той выборке, в которой содержится наибольшее число совместных измерений и не будет отражать реального распределения объемов разнотипных данных, усваиваемых в гидродинамической модели. Вторая проблема состоит в том, что перед ассимиляцией спутниковых ТПМ в гидродинамической модели они усредняются по времени, в течение суток и по пространству, по области с размерами, равными шагам модельной сетки по широте и долготе. Здесь будут получены оценки точности дистанционных ТПМ с учетом этих особенностей.

Оценка точности дистанционных ТПМ с учетом их реального распределения по спутникам и времени суток. Для оценки точности спутниковых ТПМ в целом, с учетом реального распределения карт ТПМ по разным спутникам и временам суток, нам нужно сформировать такую выборку совместных измерений, в которой число измерений, соответствующих разным временам суток и разным спутникам было бы примерно одинаковым.

Согласно данным, приведенным в табл. 1, наименьшее число совместных измерений – 37, имеет место для спутника NOAA-17 в ночное время. Поэтому, чтобы обеспечить равноприсутствие различных видов данных, число дневных совместных измерений NOAA-17, и дневных и ночных измерений NOAA-16 в выборке, формируемой для практической оценки точности спутниковых ТПМ должно быть также по 37. Этого можно добиться путем случайного выбора реально существующих совместных измерений из этих выборок.

Общее число таких синтезированных выборок составит $C_{196}^{37} \cdot C_{167}^{37} \cdot C_{119}^{37}$. Это очень большое число. Следовательно, получение искомых оценок по одной из них не является хорошим решением. С другой стороны их невозможно получить и для всех возможных синтезированных выборок. В подобных ситуациях оценки получают, генерируя не все возможные подвыборки, а некоторую их часть, такую, что получение оценок по этому подмножеству представляет, с одной стороны, обозримую вычислительную работу, а с другой, обеспечивает достаточно представительную информацию об их вариабельности при переходе от одной выборки к другой.

В нашем случае разумно рассмотреть 10 000 таких подвыборок, сгенерированных с помощью равномерного случайного выбора по номерам измерений для каждой из трех исходных подвыборок с числом измерений, большим 37. Получив 10 000 оценок систематического и среднеквадратичного отклонения можно изучить их распределения и найти средние значения и доверительные интервалы для них. По существу, все это является разновидностью метода *Bootstrap*, получившего широкое применение в практике статистического анализа данных в последние 20 – 25 лет [13].

Результаты, полученные в ходе реализации этой методологии, приведены на рис. 7, а, б и в табл. 4. Как видно из приведенных рисунков, распределение оценок систематического смещения и среднеквадратичного отклонения, полученных по синтезированным выборкам, близко к нормальному.

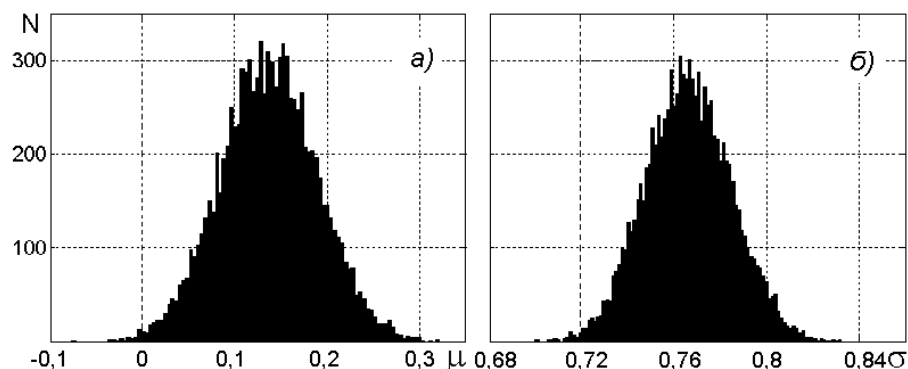


Рис. 7. Гистограммы практических оценок среднего – μ (а) и среднеквадратичного – σ (б) отклонений между спутниковыми и контактными ТПМ, полученных по методу *Bootstrap*.

Таблица 4. Практическая оценка точности спутниковых ТПМ по методу *Bootstrap*.

Параметр	μ_B	$\mu_B^{(i)}$	$\mu_B^{(s)}$	σ_B	$\sigma_B^{(i)}$	$\sigma_B^{(s)}$
Значение	0,14	0,03	0,24	0,77	0,69	0,86

Средние значения оценок среднего – μ_B и среднеквадратичного отклонения – σ_B по ансамблю синтезированных выборок оказалось ближе к соответствующим величинам, полученным по объединенной исходной выборке дневных и ночных совместных спутниковых измерений *NOAA-16* и контактных измере-

ний ТПМ. Полуширина 95% доверительного интервала для систематического отклонения согласно полученным оценкам нижней $-\mu_B^{(i)}$ и верхней $-\mu_B^{(s)}$ границ почти достигает самой средней величины $-\mu_B$. Для среднеквадратичного отклонения полуширина 95% доверительного интервала, согласно оценкам его нижней $-\sigma_B^{(i)}$ и верхней $-\sigma_B^{(s)}$ границ, составляет примерно 10% от σ_B .

В заключение следует отметить, что располагая оценками μ и σ для четырех исходных подвыборок и считая их точными, можно получить теоретико-вероятностные аналоги оценок μ_B и σ_B . Обозначим эти оценки μ_P и σ_P . Легко можно показать, что в условиях равноприсутствия различных типов данных из четырех исходных выборок имеем:

$$\mu_P = \frac{\mu_{16,D} + \mu_{16,N} + \mu_{17,D} + \mu_{17,N}}{4} \quad (3)$$

$$\sigma_P^2 = \frac{(\sigma_{16,D}^2 + \mu_{16,D}^2) + (\sigma_{16,N}^2 + \mu_{16,N}^2)}{4} + \frac{(\sigma_{17,D}^2 + \mu_{17,D}^2) + (\sigma_{17,N}^2 + \mu_{17,N}^2)}{4} - \mu_P^2 \quad (4)$$

Расчеты по формулам (3) и (4) дают следующие результаты: $\mu_P = 0,14$ и $\sigma_P = 0,77$, т.е. теоретические и *Bootstrap* – оценки совпадают с точностью до двух значащих цифр.

Основываясь на гипотезе нормальности распределения *Bootstrap* – оценок, можно также получить теоретико-вероятностные оценки для границ 95 % доверительных интервалов для μ_P и σ_P . Правда здесь возникают специфические проблемы, связанные с коррелированностью оценок μ и σ , получаемых по синтезированным выборкам, из-за того, что в этих выборках есть повторяющиеся данные. Решение такой задачи может быть основано на подходе, развитом в [14], где предложены методы, основанные на построении гарантированных оценок с учетом априорных ограничений на коэффициенты корреляции. Однако здесь мы не будем делать этого и ограничимся эмпирическими оценками границ доверительных интервалов.

Итак, нами получена оценка среднеквадратичного отклонения спутниковых ТПМ от данных дрейфтеров для объединенной выборки, содержащей ТПМ, восстановленные по измерениям спутников *NOAA-16* и *NOAA-17*, как в дневное, так и в ночное время. Теперь основываясь на всем вышеизложенном материале можно ответить на вопрос о том, какова точность спутниковых данных. Так как погрешности контактных измерений некоррелированы с другими источниками помех, то среднеквадратичное отклонение спутниковых ТПМ от контактных равно $\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_d^2$. отсюда получаем $\sigma_s = \sqrt{\sigma^2 - \sigma_d^2} \approx 0,77$, то есть погрешности измерений дрейфтеров можно считать несущественными. Если считать оценки влияния горизонтальной

неоднородности поверхностной ТПМ на отклонения между дистанционными и контактными данными справедливыми, то тогда величина погрешности спутниковых ТПМ может быть уменьшена на $\sim 10\%$, т.е. $\sigma_s \approx 0,7$.

Теперь оценим точность осредненных по пространству и времени спутниковых ТПМ, которые непосредственно усваиваются в гидродинамической модели.

Оценка точности осредненных спутниковых ТПМ. Получение оценки точности осредненных спутниковых ТПМ является не столь тривиальной задачей, как это может показаться на первый взгляд. Дело в том, что с изменением времени в пределах 1 суток и узла модельной сетки, для которого вычисляются осредненные величины, изменяется процент облачности, покрывающей модельную пространственную ячейку, окружающую этот узел. Следовательно, число индивидуальных спутниковых ТПМ, по которым выполняется осреднение будет случайным. Другая проблема состоит в том, что индивидуальные спутниковые ТПМ в пределах одной модельной пространственной ячейки сильно коррелированы между собой и, поэтому, согласно [14], осреднение не приведет к такому же улучшению точности средних, как это могло бы иметь место для некоррелированных данных. И, наконец, при осреднении на получаемые результаты будет оказывать влияние сама пространственная изменчивость ТПМ. Все эти эффекты могут быть полностью изучены в рамках детального натурно-имитационного эксперимента, который может рассматриваться как обобщение метода *Bootstrap*. Но для получения корректных оценок требуется располагать достаточно точными сведениями о корреляционных функциях поля ТПМ Черного моря в разных районах его акватории, оценить экранирующее влияние облачности в разные сезоны и времена суток на число доступных индивидуальных измерений ТПМ и т.д. Пока мы этой информацией не располагаем. В этих условиях воспользуемся более грубой оценкой.

В работе [14] показано, что в условиях когда коэффициент корреляции случайных отклонений от среднего значения неотрицателен и ограничен величиной $\rho \leq 1$, дисперсия оценки этого среднего значения – σ_μ^2 равна:

$$\sigma_\mu^2 = \sigma_T^2 \left(\rho + \frac{1-\rho}{n} \right), \quad (5)$$

где n – число измерений, по которому получена оценка среднего, $\sigma_T^2 = \sigma^2 + \sigma_{\delta T}^2$. Согласно нашим предварительным результатам, величина ρ может достигать 0,8, а $\sigma_T = 0,87$, при $\sigma = 0,77$ и $\sigma_{\delta T} = 0,4$. С учетом того, что при осреднении индивидуальных ТПМ в пределах модельной пространственной ячейки максимальное значение n не превышает 36, из (5) получаем, что $\sigma_\mu = 0,78$. Максимальное число спутниковых карт, приходящихся на 1 сутки равно 4, однако эффективное их число примерно равно 2, из-за мешающего влияния облачности. Тогда с учетом осреднения по времени, в предположении некоррелированности пространственных средних, относящихся к разным картам, полученную оценку надо уменьшить в 1,41 раза, следовательно, $\sigma_\mu = 0,55$. На самом же деле предположение о некоррелированности наверняка не выполняется и представленную оценку необходи-

мо несколько увеличить. На основе (5) можно показать, что с учетом коррелированности по времени, ожидаемая величина оценки возрастет до значений $\sigma_{\mu} = 0,6 - 0,7$.

6 Выводы и перспективы дальнейших исследований. Согласно результатам выполненных исследований точность индивидуальных спутниковых ТПМ, получаемых центром обработки дистанционных данных МГИ НАН Украины оценивается систематическим смещением $0,14^{\circ}\text{C}$ и среднеквадратичным отклонением $0,7 - 0,77^{\circ}\text{C}$. Для осредненных спутниковых ТПМ, используемых для усвоения в гидродинамической модели, ожидаемая среднеквадратичная погрешность оценивается величиной $0,55 - 0,7^{\circ}\text{C}$.

На получаемые оценки точности спутниковых ТПМ влияют следующие эффекты. Отклонения спутниковых ТПМ от контактных данных зависят от уровня ошибок фильтрации облачности. Различия между точностью спутниковых ТПМ, полученных в дневное и ночное время могут составлять $10 - 15\%$. На результаты сопоставления спутниковых ТПМ с измерениями дрейфтеров оказывают влияние эффекты дневного прогрева приповерхностного слоя моря и наличие холодной пленки в $10 - 100$ мкм от границы вода – воздух. Оба эти эффекта связаны со скоростью приповерхностного ветра. Однако, полученные нами оценки ветровой зависимости отклонений оказываются сильнее, чем те, что приведены в литературных источниках. В случае коррекции ветровой зависимости отклонений, их среднеквадратичная величина может уменьшиться на $0 - 7\%$. Коррекция влияния эффектов горизонтальной пространственной неоднородности поля ТПМ, возникающих из-за горизонтальной несовместности спутниковых и контактных измерений, может привести к улучшению получаемых оценок точности до 10% . Отклонения дистанционных ТПМ от контактных, зависят от спутника, который использовался для их получения. В случае устранения систематического смещения, ТПМ, полученные по данным ИСЗ NOAA-17 имеют точность примерно на $15 - 20\%$ лучшую, по сравнению со спутником NOAA-16.

Изложенные процедуры анализа точности спутниковых ТПМ могут найти применение в ходе реализации оперативного контроля их достоверности. Для организации оперативного контроля точности спутниковых ТПМ необходимо располагать данными контактных измерений не менее чем 10 дрейфтеров. Наиболее оптимальный сезон проведения оперативного контроля точности – период с апреля по октябрь. Представляется также весьма важным получение подобных оценок и в другое время года. Но из-за мешающего влияния облачности это навряд ли возможно в оперативном режиме.

В ходе дальнейших исследований было бы целесообразно уточнить влияние эффектов ветра на отклонения между спутниковыми и контактными ТПМ, попытаться улучшить точность процедур классификации облачности, особенно в ночное время, а также более подробно рассмотреть вопросы, связанные с оценкой точности осредненных спутниковых ТПМ. Для решения последней задачи требуется предварительно выполнить статистический анализ изменчивости поверхностной температуры Черного моря с оценкой корреляционных и структурных функций поля ТПМ. Знание статистики поля ТПМ позволило бы применить более совершенные методы оп-

тимальной интерполяции для устранения пропусков в данных связанных с мешающим влиянием облачности и повышения точности осредненных величин спутниковых ТПМ.

Работа выполнена при поддержке УНТЦ – проект Р-2241

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьяшев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке С. // В сб. Численные модели и результаты расчетов течений в Атлантическом океане. – М., ИВМ РАН. – 1992. – С. 163-231.
1. Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К., Ратнер Ю.Б. Система мониторинга гидрофизических полей Черного моря в квазиоперативном режиме // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь.: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2004. – Настоящий выпуск.
2. Korotaev G.K., Saenko O.A., Koblinsky S.J. Satellite altimetry observations of the Black Sea level // Journal of Geophysical Research. – 2001. – v.106, № С3. – P. 917-933.
3. Дорофеев В.Л. Ассимиляция спутниковых измерений поверхностной температуры Черного моря в модели циркуляции // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь.: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2004. – Настоящий выпуск.
4. Sybrandy A.L., Martin C., Niiler P.P. et al. WOCE Surface Velocity Programme Barometer Drifter Construction Manual // WOCE Report № 134/95; SIO Report № 95/27, UNESCO DBCP Technical Document Series № 7. – 1995. – 63 p.
5. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. – Л.: Гидрометеоздат. – 1985. – 376 с.
6. C. J. Donlon C. J, Minnet P. J, Gentemann C. et al. Toward Improved Validation of Satellite Sea Surface Skin Temperature Measurements for Climate Research // Journal of Climate. – 2002. – v. 15, № 4. – P. 353-369.
7. Emery W. J, Castro Sandr, Wick G. A. et al. Estimating Sea Surface Temperature from Infrared Satellite and In Situ Temperature Data // Bulletin of the American Meteorology Society. – 2001. – v. 82, № 12. – P. 2773-2785.
8. Stowe L. L., Davis P. A., McClain E. P. Scientific Basis and Initial Evaluation of the CLAVR-1 Global Clear/Cloud Classification Algorithm for the Advanced Very High Resolution Radiometer // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 1999. – v. 16, № 6. – P. 656-681.
9. Хампель Ф., Рончетти Э., Райссей П. и др. Робастность в статистике. – М.: Мир. – 1989. – 512 с.
10. McClain E. P., Pichel W. G. and Walton C. C. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. // J. Geophys. Res. – 1985. – v. 90, № 11. – P. 587-601.
11. Sen Z. Objective Analysis by Cumulative Semivariogram Technique and Its Application in Turkey. // J. Applied Meteorology. – 1997. – v. 36, № 12. – P. 1712-1724.
12. Efron B. and Tibshirani R.J. An Introduction to the Bootstrap. Chapman and Hall, N.Y. – 1993. – 329 pp.
13. Бахтиян Б.Ц., Назиров Р.Р., Элясберг П.Е. Определение и коррекция движения. – М.: Наука. – 198. – 360 с.

Материал поступил в редакцию 25.11.2004 г.

После доработки 28.12.2004 г.