

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК 551.465

ГЛОК НАТАЛЬЯ ИВАНОВНА

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ
ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ И СТЕРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ
МИРОВОГО ОКЕАНА**

Специальность 25.00.28 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург

2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ)

Научный руководитель:

доктор географических наук,
профессор

Малинин Валерий Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор географических наук,
профессор

Алексеев Генрих Васильевич

кандидат географических
наук, старший научный сотрудник

Белоненко Татьяна Васильевна

Ведущая организация:


**Санкт-Петербургское отделение
федерального государственного
бюджетного учреждения «Госу-
дарственный океанографический
институт имени Н.Н.Зубова»
(СПО ФГБУ «ГОИН»)**

Защита состоится "12" декабря 2013 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.197.02 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98, ауд. 308.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98

Автореферат разослан " 12 " ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук



Воробьев
Владимир Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Климат на нашей планете постоянно меняется, и, в первую очередь, это вызвано резким изменением глобальной температуры воздуха, которая в течение XX века увеличилась на 0,6-0,7 °С. Учитывая тесную взаимосвязь атмосферы и океана, процессы, происходящие в ней, не могут не сказываться на водной оболочке нашей планеты. Одновременно процессы в океане оказывают стимулирующее влияние на тепловой режим и общую циркуляцию атмосферы. В этом плане особую роль играет теплосодержание Мирового океана (ТСМО), которое является важнейшим фактором изменений глобального климата, так как он имеет высокую теплоемкость и инерционность. Кроме того, ТСМО практически полностью определяет стерические колебания уровня Мирового океана (СКУМО), вклад которых в формирование тренда глобального уровня может составлять от 15 до 50 % в зависимости от интервала временного осреднения.

Однако непосредственная оценка ТСМО и СКУМО является чрезвычайно сложной задачей, так как глубоководные данные о температуре для многих районов океана отсутствуют, а количество наблюдений постоянно менялось во времени, причем год от года их число могло изменяться в 1,5 раза. В связи с этим возникает задача их статистической параметризации, суть которой сводится к построению лаконичных статистических моделей, позволяющих оценивать межгодовую изменчивость ТСМО и СКУМО по сравнительно небольшому набору легко измеряемых параметров, в том числе по спутниковым данным.

Цель работы: исследование закономерностей межгодовой изменчивости теплосодержания и термостерических колебаний уровня Мирового океана и построение статистических моделей их оценки.

Исходя из поставленной цели, были сформулированы следующие **задачи:**

- выявление закономерностей межгодовой изменчивости теплосодержания Мирового океана;
- построение статистических моделей межгодовой изменчивости теплосодержания Мирового океана по данным спутников и реанализа о температуре поверхностного слоя воды;
- выявление закономерностей термостерических колебаний уровня Мирового океана (УМО);
- физическое обоснование и построение физико-статистической модели термостерических колебаний уровня Мирового океана (ТСКУМО);
- построение статистической модели термостерических колебаний уровня Мирового океана по реанализу и спутниковым данным температуры его поверхности.

Материалы и методы. Основой работы послужили следующие архивы гидрометеорологических данных, находящихся в свободном доступе в сети Интернет:

– среднемесячные данные о поверхностной температуре океана в узлах широтно-долготной сетки $2 \times 2^\circ$ из глобального архива NOAA NCDC ERSST (National Oceanic and Atmospheric Administration National Climatic Data Center Extended Reconstructed Sea Surface Temperature);

– суточные данные о поверхностной температуре океана в узлах широтно-долготной сетки $0,25 \times 0,25^\circ$ из глобального архива NOAA NCDC OISST (National Oceanic and Atmospheric Administration National Climatic Data Center Optimum Interpolation Sea Surface Temperature);

– среднемесячные данные о глубоководной температуре и вертикальных скоростях воды в узлах широтно-долготной сетки $0,5 \times 0,5^\circ$ из глобального архива SODA (Simple Ocean Data Assimilation);

– тренды поверхностной температуры океана из архива HadISST1 (Hadley Central Sea Ice and Sea Surface Temperature Dataset) в узлах географической широтно-долготной сетки $2 \times 2^\circ$.

Для выполнения поставленных задач использовался комплекс методов многомерного статистического анализа, теории случайных функций, вейвлет-анализ.

Научная новизна:

– выявлены закономерности межгодовой изменчивости теплосодержания Мирового океана. Показано, что за период с 1955 по 2010 гг. трендовая составляющая является значимой и носит положительный характер, однако, начиная с 2003 г. происходит значительное замедление роста теплосодержания. В данных ТСМО обнаружены два устойчивых цикла с периодами в 23 и 15 лет;

– установлены особенности распределения трендов временного хода температуры воды в отдельных океанах в слое 0–3000 м. Для всех океанов тренды являются значимыми до глубины порядка 1500 метров. При этом на разных горизонтах отмечаются как положительные, так и отрицательные тренды. Однако, начиная с 500 м, проявляется тенденция к уменьшению величины положительного тренда с глубиной;

– разработаны статистические модели межгодовых изменений теплосодержания Мирового океана по данным спутников и реанализа о температуре поверхностного слоя воды;

– выявлены закономерности термостерических колебаний уровня Мирового океана. Показано, что в термостерических колебаниях уровня Мирового океана с 1880 по 2005 гг. присутствует значимое колебание с периодом в 57 лет, которое отчетливо проявляется и для температуры поверхности океана. Обнаружены также колебания с периодами 22 – 25 лет, 15 и 7 – 8 лет. Установлено, что трендовая компонента обеспечивает максимальный вклад в дисперсию термостерического ряда, который составляет не менее 77 %, причем на долю значимых циклов приходится в среднем около 10 %;

– разработана физико-статистическая модель термостерических колебаний УМО, представляющая собой сумму двух компонент: «быстрой», отвечающей

за внешний тепловой баланс океана и «медленной», определяющей перераспределение тепла в толще воды до нижней глубины главного термоклина;

– разработана статистическая модель термостерических колебаний УМО на основе спутниковых данных о температуре поверхности океана (ТПО);

На защиту выносятся:

– закономерности изменений теплосодержания и термостерических колебаний уровня Мирового океана в современных климатических условиях;

– статистические модели межгодовых изменений теплосодержания океана по данным спутников и реанализа температуры поверхностного слоя воды;

– физико-статистическая модель термостерических колебаний уровня Мирового океана;

– статистическая модель термостерических колебаний уровня Мирового океана по реанализу и спутниковым данным о поверхностной температуре воды.

Практическая значимость работы. Модели теплосодержания и термостерических колебаний уровня могут рассматриваться как часть системы мониторинга характеристик Мирового океана и использоваться в полуэмпирических моделях климата.

Личный вклад автора. Подготовка архивов информации, проведение статистических расчетов, выполнение необходимых графических построений, обобщение и анализ результатов.

Апробация работы и публикации. Данная работа была выполнена в рамках Аналитической ведомственной целевой программы «Оценить последствия повышения уровня океана в условиях современных изменений климата» № 2.1.1/6690 и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (государственные контракты № П726 и № 02.740.11.0849), а также в рамках гранта Правительства РФ (Договор № 11.G34.31.0078) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых. Основные результаты диссертации были представлены в рамках шестнадцатой Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов и отмечены грантом губернатора Санкт-Петербурга.

По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 6 из них в рецензируемых журналах по перечню ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографического списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 125 страницы, включая 13 таблиц и 33 рисунка. Список литературы составляет 100 наименований.

Благодарности. Автор искренне благодарит научного руководителя профессора В.Н. Малинина за конструктивное руководство и всестороннюю поддержку в работе, а так же к.г.н. С.М. Гордееву за консультации и помощь.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи исследования.

Первая глава «Современное состояние изученности теплосодержания и стерических колебаний уровня Мирового океана» посвящена исследованию и методам расчета теплосодержания и стерических колебаний уровня Мирового океана.

В разделе 1.1 «Основные факторы формирования колебаний уровня Мирового океана» рассмотрены три основных группы факторов, влияющих на колебания УМО: космогеофизические силы, геолого-геодинамические и гидрометеорологические процессы. Оценены периоды и масштабы их действия.

На основе отчетов Межправительственной группы экспертов по изменению климата проанализированы количественные оценки вкладов отдельных факторов в формирование тренда УМО. Показано, что стерические колебания в отдельные периоды времени (1993 – 2003 гг.) могут определять до 50 % изменений уровня Мирового океана.

Раздел 1.2 «Методы получения исходных данных, используемых для оценки теплосодержания и стерических колебаний морского уровня» посвящен исследованию двух подходов определения теплосодержания и СКУМО – использованию глубоководных данных на основе контактных методов измерений с последующим их пересчетом и применению бесконтактных спутниковых измерений, как разности между альтиметрическими и GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) данными. Рассмотрены всемирные базы данных World Ocean Database (WOD) и атласы World Ocean Atlas (WOA), на основе которых проводятся глобальные расчеты ТСМО и СКУМО, проанализированы технические устройства, применяемые для формирования баз WOD, их основные характеристики, принципы работы, способы измерений и погрешности, а так же районы их применения. Подробно рассмотрены проблемы, возникающие при использовании глубоководных данных, связанные с пространственным покрытием Мирового океана, а так же с точностью измерений. Для бесконтактного метода приведены принципы работы и точность альтиметрических и GRACE измерений.

Для временного интервала с 2004 по 2008 гг. проведен сравнительный анализ СКУМО по данным, полученным обоими способами. Следует отметить, что ряды сильно отличаются, оценки СКУМО по данным проекта Арго имеют заниженные величины относительно бесконтактных методов и несколько отличный характер изменения. Причина такого расхождения еще до конца не определена, но может быть связана с недостаточной выборкой *in situ* измерений.

В разделе 1.3 «Краткий обзор исследований теплосодержания Мирового океана» проведен анализ исследования ТСМО по литературным данным.

Существенная часть тренда ТСМО определяется слоем от поверхности до 700 м, который описывает 69 % от изменения теплосодержания в слое от 0 до 3000 м.

В работе представлены методы устранения систематических ошибок архивных данных для расчета достоверных оценок ТСМО. Подробно рассмотрен ряд версий температурного анализа [Ishii et. al., 2006], полученных по различным базам данных с применением коррекции ошибок, как для отдельных видов измерительных приборов, так и для их совокупности, расхождения между ними, и влияние их на оценки ТСМО.

Проведен сравнительный анализ длительных откорректированных рядов межгодовой изменчивости ТСМО, полученных различными группами ученых. Показано, что хорошая согласованность временного хода ТСМО отмечается лишь на отдельных участках рассматриваемого временного интервала, а расхождения в его оценках для отдельных рядов являются весьма существенными и могут достигать 9 мм.

Описано пространственное распределение трендовой составляющей временной изменчивости теплосодержания для различных районов Мирового океана (МО). Формирование тренда по полушариям не является равнозначным, основные изменения происходят в северном полушарии. При этом максимальное увеличение теплосодержания наблюдается в Атлантическом океане, тренд для которого за период с 1969 по 2008 гг. составил около половины тренда временного хода ТСМО.

В разделе 1.4 «Краткий обзор исследований стерических колебаний уровня Мирового океана» проведен анализ СКУМО по литературным данным. Рассмотрены различные подходы к оценке ТСКУМО.

Оценен вклад солёностной и термической компоненты в формирование СКУМО. Тренд термической составляющей за период с 1955 по 2003 гг. определяет 89 % дисперсии стерических колебаний уровня Мирового океана, поэтому в глобальном масштабе солёностной компонентой часто пренебрегают и рассматривают лишь термическую.

Показано, что большая часть трендовой составляющей ТСКУМО формируется в слое от 0 до 700 м и описывает 75% тренда временного хода термостерического уровня для слоя от 0 до 3000 м, а коэффициент корреляции между рядами ТСКУМО данных слоев составляет $r = 0,99$. Таким образом, хотя термостерические колебания в слое от 0 до 700 м заметно занижают величину тренда, они вполне адекватно описывают межгодовые ТСКУМО.

Рассмотрены несколько длинных временных рядов ТСКУМО, полученных разными авторами с использованием разных архивов данных глубоководной температуры, а так же на основе различных методов ее обработки. Проанализированы общие закономерности и различия рядов. Отмечено, что начиная с 2004 г. во всех оценках ТСКУМО происходит некоторое замедление их роста, что хорошо согласуется с изменениями ТСМО.

Вторая глава «*Статистические методы анализа данных, используемые в работе*» посвящена анализу статистических методов обработки данных, их характеристикам, достоинствам и недостаткам.

В разделе 2.1 «*Анализ трендовой компоненты временного ряда*» рассмотрены особенности трендовой компоненты и ее изменчивость относительно выбранного временного интервала. Определены особенности применения параметрических и непараметрических характеристик тренда. Описаны основные параметрические характеристики: коэффициент детерминации, величина и значимость тренда.

Раздел 2.2 «*Анализ циклических колебаний временного ряда*» посвящен выявлению и оценке циклических (гармонических) колебаний. Рассмотрены ограничения применения гармонического и спектрального анализа при исследовании гидрометеорологических процессов. Обосновано применение вейвлет-анализа и описаны его основные принципы, позволяющие представлять исследуемый одномерный сигнал в двумерной плоскости частота – положение. Рассмотрено прямое и обратное интегральное вейвлет-преобразование, дискретное вейвлет-преобразование и проведено их сравнение относительно решаемой задачи. Введены условия, выполнение которых необходимо для конструирования базисной анализирующей функции. Рассмотрены разновидности вейвлетобразующих функций, обоснован выбор вейвлета Морле и приведено его описание, получен вейвлет-спектр, полная энергия сигнала и глобальный спектр энергии.

В разделе 2.3 «*Множественный регрессионный анализ*» приведено описание метода одновременного учета воздействия всех факторов системы – множественного (многофакторного) регрессионного анализа. Сформулированы условия построения эффективной модели и приведены требования к исходным данным для построения надежной модели множественной линейной регрессии (МЛР). Рассмотрена задача выбора эффективных предикторов и построения оптимальной модели МЛР методом пошаговой регрессии с использованием трех наиболее распространенных алгоритмов – метода включения, метода исключения и метода включения-исключения переменных (F-метода). Описаны критерии оценки качества модели МЛР.

В третьей главе «*Теплосодержание Мирового океана и его межгодовая изменчивость*» обсуждаются закономерности колебаний теплосодержания Мирового океана и результаты построения статистических моделей ТСМО.

В разделе 3.1 «*Закономерности колебаний теплосодержания Мирового океана*» рассмотрены оценки межгодовой изменчивости теплосодержания, рассчитанные различными группами ученых с применением разных методик обработки исходной информации. Проведена оценка расхождений трендов, величины которых за период с 1955 по 2009 гг. изменяются от $0,16 \times 10^{22}$ до $0,26 \times 10^{22}$ Дж/год. Корреляция между временными рядами аномалий ТСМО достаточно высока и изменяется в пределах от 0,70 до 0,94, а после исключения трендов – в пределах 0,54–0,79. Для нивелирования случайных ошибок имеющих рядов путем осреднения отдельных членов каждого из них в фиксиро-

ванные моменты времени сформирован осредненный ряд аномалий ТСМО. Осредненному ряду аномалий ТСМО свойствен отчетливый линейный тренд ($Tr = 0,22 \times 10^{22}$ Дж/год), описывающий 75 % дисперсии ряда.

Для выявления внутренней структуры межгодовой изменчивости осредненного ряда аномалий ТСМО применен вейвлет-анализ, благодаря которому выявлены два значимых цикла с периодами 23 и 15 лет, первый из которых определен на всем временном интервале, а второй лишь с 1975 г. по 2005 г. (рисунок 1)

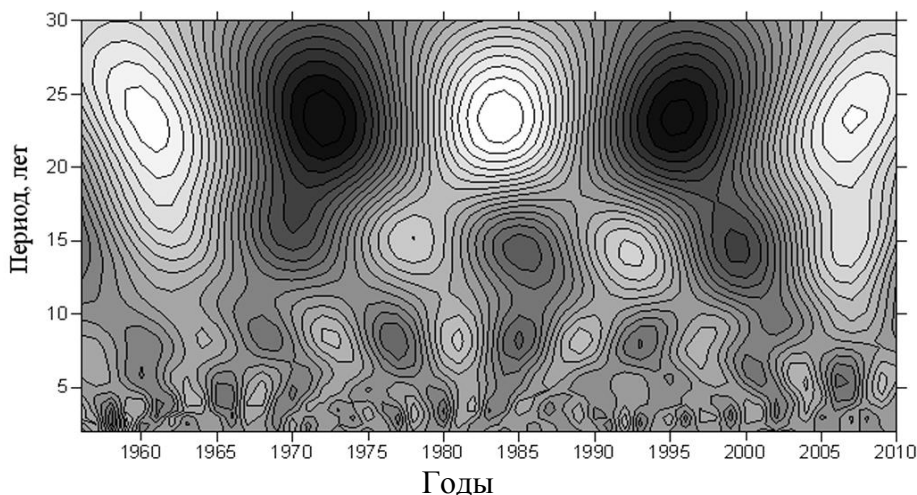


Рисунок 1 – Коэффициенты вейвлет-разложения осредненного по данным разных авторов временного ряда аномалий теплосодержания Мирового океана за период с1955 по 2009 гг. на основе вейвлета Морле

В разделе 3.2 «Статистическая модель оценки среднегодовых значений теплосодержания Мирового океана на основе реанализа температуры его поверхности» продемонстрирован согласованный характер межгодовых колебаний аномалий ТСМО с глобальными значениями аномалий ТПО, полученной из архива HadSST, и приповерхностной температуры воздуха архива CRUTEM4. Доказана принципиальная возможность построения статистической модели ТСМО по архивным данным о температуре поверхности океана.

При сравнительном анализе пространственного распределения трендовой компоненты теплосодержания показано, что ее оценки не везде соответствуют значениям трендов ТПО, то есть помимо поступающей на поверхность океана энергии на формирование областей с повышенным теплосодержанием оказывает влияние океаническая циркуляция, перераспределяющая тепло внутри океана.

По данным реанализа аномалий ТПО архива ERSST методом множественной линейной регрессии построены статистические модели аномалий ТСМО при различном числе включаемых переменных, и проведен комплексный анализ их основных параметров. Статистическая модель для оценки аномалий ТСМО имеет вид:

$$\Delta H = f(\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_m), \quad (1)$$

где ΔT_i – аномалии ТПО в узлах выбранной сетки, m – число узлов (8200 значений).

В качестве исходной выборки ТСМО был выбран ряд, полученный [Levitus et al., 2009], который рассчитан по максимальному объему глубоководной информации и имеет постоянную поддержку. Указанный ряд был разделен на 2 выборки: зависимую (1968-2004 гг.), по которой определялись параметры модели, и независимую (2005-2009 гг.), используемую для проверки ее качества.

При увеличении количества предикторов в модели коэффициент детерминации плавно возрастает, а стандартная ошибка также плавно убывает. Оценки p -level коэффициентов регрессии показали, что в моделях с 8 и 10 предикторами несколько коэффициентов регрессии являются незначимыми, поэтому в качестве оптимальной была принята модель с 7 предикторами, для которой $R^2 = 0,88$, а $\sigma_y = 0,6 \times 10^{22}$ Дж.

На независимом периоде расхождения между фактическими и вычисленными по модели значениями ТСМО малы и носят случайный характер (рисунок 2). Таким образом, статистическая модель на основе данных всего лишь 7 двухградусных квадратов ТПО адекватно описывает процесс изменения ТСМО и обеспечивает восстановление межгодовых колебаний аномалий ТСМО с ошибкой, меньшей стандартного отклонения.

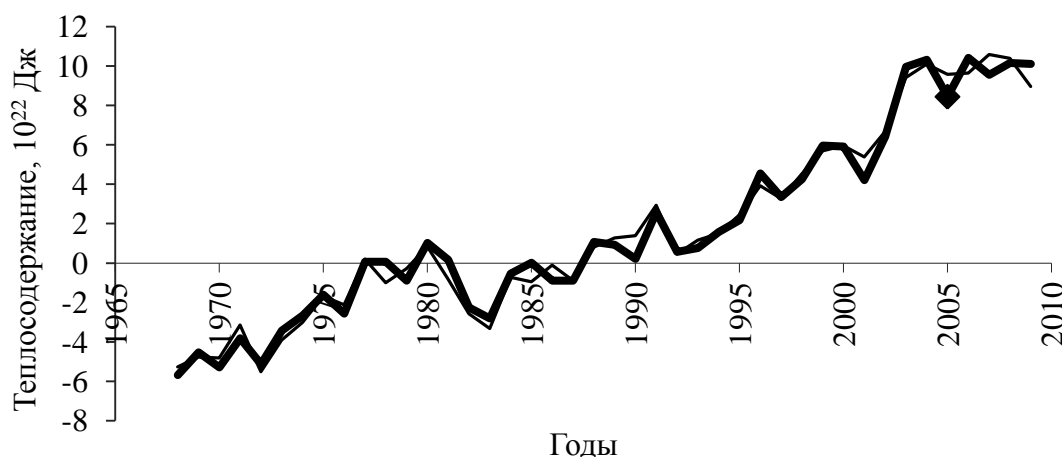


Рисунок 2 – Временной ход аномалий теплосодержания Мирового океана по данным [Levitus et al., 2009]. Толстая кривая – исходные значения аномалий ТСМО, тонкая кривая – вычисленные значения аномалий ТСМО по модели (1). Квадрат – начало расчета аномалий ТСМО по независимым данным о ТПО.

В разделе 3.3 «Статистическая модель оценки теплосодержания Мирового океана на основе спутниковых данных температуры поверхностного слоя воды» рассмотрен архив спутниковых данных ТПО Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST), его достоинства и недостатки. Произведено сравнение глобальных значений аномалий ТПО архивов OISST и ERSST, показано

наличие высокой корреляции ($R = 0,94$) между рядами и небольшое систематическое занижение ТПО по данным архива OISST.

Оценка связи аномалий ТСМО с глобальными рядами ТПО по данным архива OISST за период с 1982 по 2009 гг. позволила определить, что максимальная корреляция отмечается при запаздывании теплосодержания на 1 год ($R = 0,90$). Это позволяет построить простую линейную прогностическую модель теплосодержания Мирового океана с заблаговременностью в 1 год:

$$H_i = b_0 + b_1 T_{(i-1)}, \quad (2)$$

Среднеквадратическая ошибка данной модели составляет $\sigma_y = 1,62 \times 10^{22}$ Дж, что меньше стандартного отклонения исходной выборки.

Для построения более точной модели теплосодержания Мирового океана расчет производился по формуле 1 с использованием всего объема данных архива OISST, при этом отбор наиболее эффективных предикторов так же осуществлялся с использованием многомерной линейной регрессии с пошаговым включением переменных.

Оптимальная модель теплосодержания содержит 7 предикторов, расположенных в разных частях океана, имеет коэффициент детерминации равный $R^2 = 0,94$ и стандартную ошибку $\sigma_y = 0,9 \times 10^{22}$ Дж, что значительно меньше стандартного отклонения исходного временного ряда аномалий ТСМО (рисунок 3).

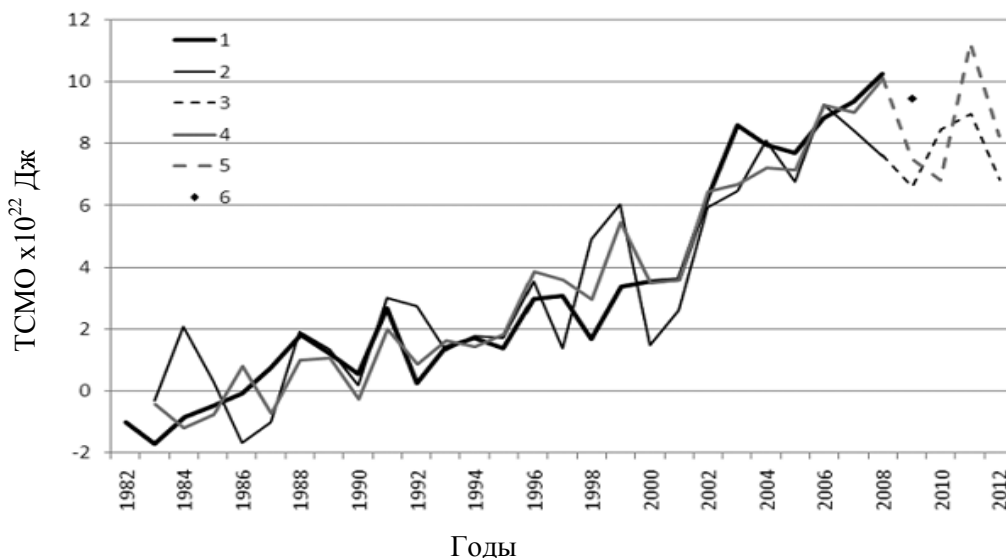


Рисунок 3 – Сопоставление фактических значений аномалий теплосодержания Мирового океана (линия 1) и вычисленных по моделям (2) и (1) (линии 2 и 4, соответственно). Пунктиром показаны независимые расчеты по моделям (2) и (1) (линии 3 и 5, соответственно); маркером (6) отмечено фактическое независимое значение теплосодержания.

Результаты, полученные по обоим моделям, на независимом интервале оказались похожими и подтверждают ранее сделанный вывод о начавшемся в последние годы охлаждении толщи Мирового океана.

Таким образом, спутниковые данные о ТПО являются репрезентативными для построения статистических моделей теплосодержания Мирового океана. Кроме того, статистическая модель (2) дает возможность приближенного прогноза аномалий ТСМО с заблаговременностью 1 год.

Четвертая глава посвящена разработке *«физико-статистической модели термостерического уровня Мирового океана»*.

В разделе 4.1 *«Закономерности термостерических колебаний уровня Мирового океана»* произведено сравнение четырех рядов данных временной изменчивости ТСКУМО, полученных различными учеными. Для периода с 1960 по 2003 гг. коэффициенты корреляции между исходными рядами всех авторов являются значимыми по критерию Стьюдента и имеют корреляцию в пределах 0,71 – 0,90. Для стационарных рядов (после исключения тренда), она уменьшилась до 0,46 – 0,64.

Однако, несмотря на высокую корреляцию между рядами ТСКУМО, оценки линейных трендов существенно различаются. Максимальный тренд ТСКУМО ($Tr = 0,45$ мм/год) отмечается в оценках [Marčelja, 2010], а минимальный проявляется в данных [Levitus et al., 2012] и составляет $Tr = 0,32$ мм/год.

Проведено вейвлет-преобразование рядов ТСКУМО, полученных различными авторами. Для ряда [Marčelja, 2010] за период с 1880 по 2005 гг., отчетливо выделяется 57-летний цикл, определенный на всем временном интервале. Цикл с периодом 19 – 20 лет выражен значительно слабее и присутствует в данных до середины 80-х годов. Кроме того можно отметить слабые 6 – 8-летние колебания, наблюдаемые с середины прошлого столетия.

На более коротких рядах ТСКУМО, рассчитанных [Levitus et al., 2012] и [Domingues et al., 2008], выявлены постоянные циклы с периодом 23 – 25 лет, а так же два локальных цикла: первый, с периодом 15 лет, определенный с 1970 по 1975 гг. до начала 21 века, и второй с периодом 6 – 8 лет, определенный на всем временном интервале в данных [Domingues et al., 2008], а в данных [Levitus et al., 2012] с 1992 по 2010 гг.

Показано, что определяющая роль в межгодовых колебаниях ТСКУМО принадлежит тренду, вклад которого в дисперсию исходного ряда для всех оценок составляет более 75 %. Вклад циклических и случайных колебаний в дисперсию ТСКУМО примерно равнозначен и значительно меньше трендового. Таким образом, с точки зрения моделирования и прогнозирования ТСКУМО, именно учет трендовой компоненты является принципиально важной задачей.

В разделе 4.2 дается *«физическое обоснование модели»*. Обсуждается гипотеза, в соответствии с которой формирование термостерических колебаний уровня в конкретный момент времени представляет сумму двух компонент: «быстрой» и «медленной». «Быстрая» компонента обусловлена внешним теп-

ловым балансом океана и определяет колебания теплосодержания деятельного слоя (с периодом тепловой адаптации системы океан-атмосфера в несколько недель), а «медленная» компонента – нагревание (охлаждение) океана сверху и перераспределение тепла по всей его толще до нижней границы главного термоклина, что в основном определяется трендом.

Для широтных зон $15,5 - 20^\circ$ с.ш. и $32,5 - 37^\circ$ с.ш., где наблюдаются пики максимума и минимума изменения термостерического уровня для отдельных океанов и Мирового океана в целом, дана оценка вертикального распределения линейных трендов временных рядов температуры воды. Распределение трендов по глубине в разных океанах существенно отличается, что свидетельствует о неодинаковых причинах их формирования, при этом значимые тренды температуры наблюдаются до глубин порядка 1500 м. Решающее влияние на формирование трендов оказывает система океанской циркуляции, которая «размазывает» поступающий сверху «климатический сигнал» практически по всей акватории океана. Оценки вертикальных скоростей на основе глобального архива SODA показали, что климатический сигнал от поверхности до глубин 1500 – 1800 м может пройти примерно за 20 лет.

Раздел 4.3 «Модель «быстрой» компоненты термостерических колебаний уровня Мирового океана» посвящен рассмотрению случайных колебаний ТСКУМО.

Статистическую модель «быстрой» компоненты ТСКУМО можно представить в виде:

$$h_{\text{быстр}} = f(\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_m), \quad (3)$$

где f – некая функция от аномалий годовых значений ТПО, m – число исходных точек с данными ТПО, взятых из глобального архива NOAA NCDC ERSST v3 в узлах широтно-долготной сетки $2 \times 2^\circ$.

Для расчета «быстрой» компоненты ряда ТСКУМО все данные поверхностной температуры были приведены к стационарному виду путем удаления трендовой составляющей с целью предотвратить ее возможное влияние на формирование тренда в «быстрой» компоненте. Из 8280 значений трендов поля ТПО 6500 (78 %) оказались значимыми по критерию Стьюдента. Для уменьшения количества используемых при расчете архивных данных были выбраны значимые коэффициенты корреляции «быстрой» компоненты термостерического уровня океана с ТПО, где в качестве «быстрой» компоненты ТСКУМО выступала разность исходных значений ряда ТСКУМО и его трендовой составляющей. В результате получено 2590 значимых коэффициентов корреляции.

Для построения модели «быстрой» компоненты ТСКУМО применялся метод множественной линейной регрессии с алгоритмом пошагового включения переменных. Модель рассчитывалась для зависимой выборки за период с 1955 по 2007 гг. Результаты расчетов показали, что до 9 шага все включаемые в модель переменные являются значимыми при уровне значимости $\alpha = 0,05$. К сожалению, выделить оптимальный шаг модели оказалось чрезвычайно сложно,

поэтому исходя из распределения статистических параметров, рассматривались модели в которые вошли от 1 до 7 предикторов. Исключив первые 2 шага которые дают максимальную ошибку, остальные 5 были усреднены, и таким образом была получена средняя модель по 5 моделям. На зависимом периоде модель описывает 83 % дисперсии исходного ряда «быстрой» компоненты ТСКУМО, при этом стандартная ошибка составляет 1,28 мм. Стандартная ошибка модели для независимых данных равна 2,86 мм, что меньше стандартного отклонения исходного временного ряда ТСКУМО ($\sigma = 3,11$ мм).

В разделе 4.4 «Модель «медленной» компоненты термостерических колебаний уровня Мирового океана» отдельно рассмотрена «медленная» компонента ТСКУМО, которая была представлена как сумма тренда и колебаний уровня не описанных моделью (3).

Для построения модели «медленной» составляющей ТСКУМО применялся метод сдвиговой пошаговой множественной линейной регрессии, где в качестве предикторов выступали среднегодовые значения ТПО из архива ERSST. Использование значений поверхностной температуры за предшествующие периоды позволяет получить прогноз на несколько лет вперед.

Прогностическая модель компоненты $h_{медл}$ представлена в виде:

$$h_{медл,i} = f(T_{1(i-\tau)}, T_{2(i-\tau)}, \dots, T_{m(i-\tau)}), \quad i=1, m, \quad (4)$$

где τ – сдвиг в годах, m – число исходных точек.

Взаимнокорреляционная функция ТСКУМО [Levitus et al., 2012] от ТПО выявила, что коэффициенты корреляции остаются максимальными (0,86 – 0,90) до 8 сдвига, что позволяет построить 8 моделей с заблаговременностью от 1 года до 8 лет. При включении в модели уже первых трех предикторов точность описания $h_{медл}$ достигает 88 – 92 % дисперсии, при этом стандартные ошибки моделей $\sigma_{y(x)}$ изменяются от 1,8 мм/год (сдвиг 2 года) до 1,5 мм/год (сдвиг 6 лет).

Модель, полученная после осреднения оценок $h_{медл}$ на каждом сдвиге τ показала хорошую аппроксимацию на зависимом периоде с 1955 по 2007 гг., однако проверка на независимых данных выявила занижение ТСКУМО.

Тренд за период с 2008 по 2014 гг. ($Tr = -0,18$ мм/год) является незначимым по критерию Стьюдента. Так как «медленная» составляющая ТСКУМО в большей степени отвечает за повышение уровня, то полученные результаты означают заметное замедление темпа роста ТСКУМО

В разделе 4.5 «Прогностическая модель термостерического уровня Мирового океана» рассмотрена полная модель ТСКУМО, представляющая собой сумму «медленной» и «быстрой» компоненты.

При наложении двух компонент наблюдается небольшое снижение уровня, что определено значительной ролью «медленной» компоненты (рисунок 4), в то время как в оценках [Levitus et al., 2012], наоборот, наблюдается слабый рост ТСКУМО. Оценки термостерических колебаний, полученные на основе альти-

метрических и GRACE данных, так же несколько расходятся с оценками [Levitus et al., 2012] и с 2005 г. показывают некоторое снижение термостерического уровня.

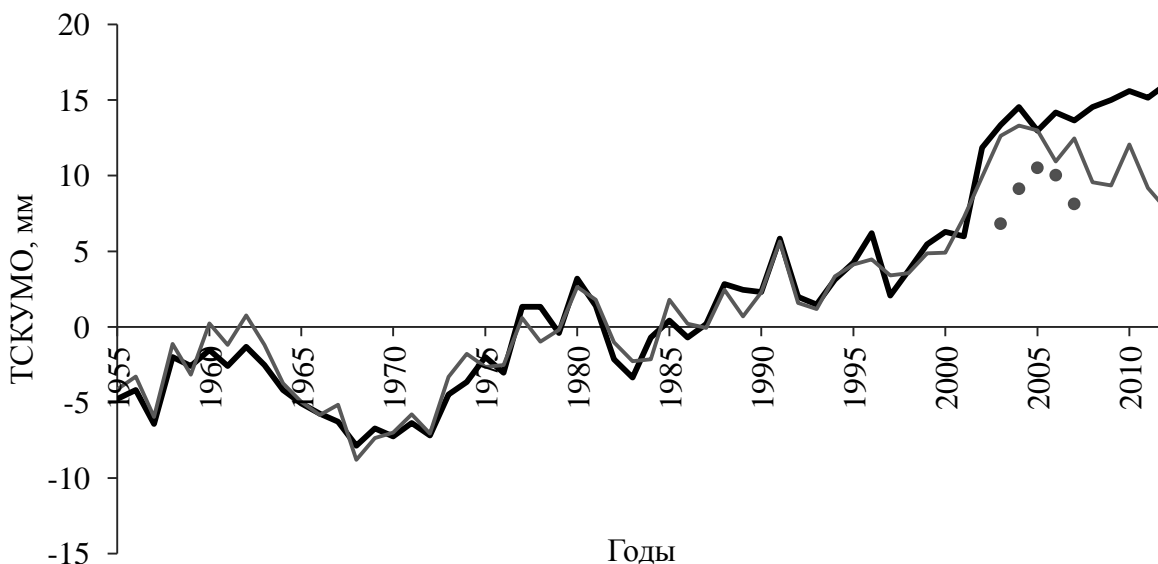


Рисунок 4 – Временной ход термостерических колебаний уровня Мирового океана по данным [Levitus et al., 2012] (черная линия), суммарная модель (серая линия), оценки [Cazenave et al., 2009] по альтиметрическим и GRACE данным (кружки).

Таким образом, учет трендовой составляющей является основной задачей при моделировании ТСКУМО. Так как данные ТПО плохо моделируют трендовую компоненту ТСКУМО, которая не должна заметно меняться при прогнозировании с заблаговременностью в 1 год, прогностическая модель была представлена суммой остаточного ряда и тренда, определенного за предшествующий период.

Оптимальная прогностическая модель остаточного ряда с заблаговременностью в 1 год включает в себя 7 предикторов, при этом коэффициент детерминации составляет 0,84, а стандартная ошибка модели 1,35 мм, что меньше стандартного отклонения (3,22 мм). При использовании такой модели после добавления трендовой составляющей (рисунок 5), прогнозируемый на 2013 г. уровень термостерической компоненты составил 17,72 мм, при значении ТСКУМО на 2012 г. равном 16,05 мм. Таким образом, по полученным данным можно сделать вывод о том, что в 2013 г. ТСКУМО должно несколько возрасти.

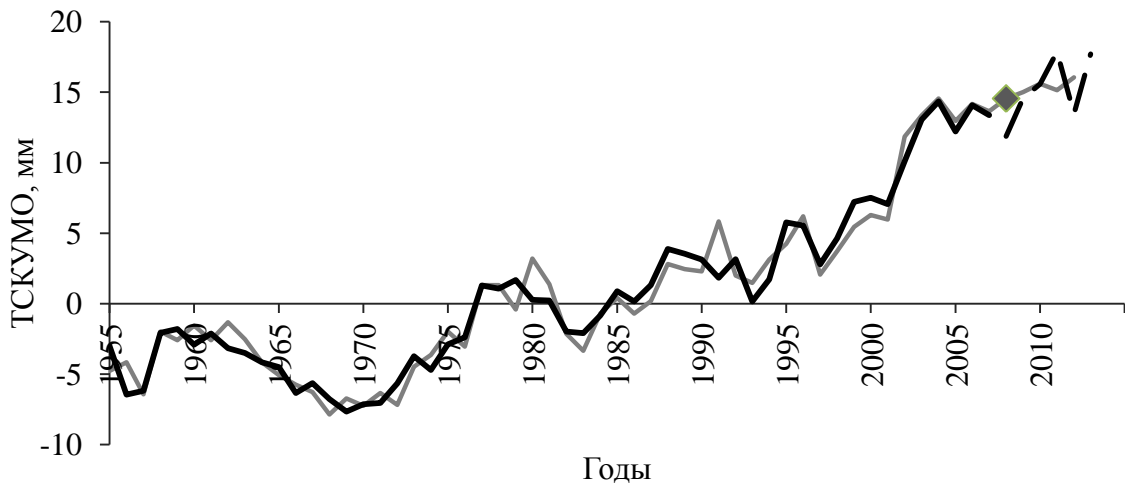


Рисунок 5 – Временной ход термостерического уровня Мирового океана по данным [Levitus et al., 2012] (серая линия) и прогностическая модель на 1 год (черная линия). Пунктиром показаны независимые расчеты

Раздел 4.6 «Оценка термостерических колебаний уровня Мирового океана на основе спутниковых данных температуры поверхности океана». Оценка ТСКУМО проводилась на основе поверхностной температуры МО по спутниковым данным из архива OISST. При этом временной ряд ТСКУМО был представлен суммой двух компонент – тренда и отклонений от тренда:

$$\Delta h_{\text{стер}} = Tr_{\text{стер}} + \Psi(\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_m), \quad (5)$$

где Ψ – некая функция, подлежащая определению, ΔT_i – значения аномалий ТПО в узлах географической сетки $0,25 \times 0,25^\circ$ архива NOAA NCDC OISSTv.2, m – количество предикторов.

Исходный временной ряд ТСКУМО предварительно был разделен на 2 выборки: зависимую (1982 – 2007 гг.), по которой определялись параметры модели, и независимую (2008 – 2011 гг.), используемую для проверки ее качества.

С увеличением числа предикторов возрастает коэффициент детерминации и при этом моделью описываются не только закономерности, присущие случайной компоненте ТСКУМО, но и ее ошибки. Учитывая подобный характер распределения указанных параметров, было решено отобрать 5 моделей: с 3-го шага по 7-й. В этом случае R^2 меняется от 0,82 до 0,96, а $\sigma_{y(x)}$ от 0,96 до 0,50 мм/год. Так как стандартное отклонение случайной компоненты ТСКУМО составляет 2,14 мм/год, то все модели имеют высокую точность, и, в качестве оптимальной, была принята средняя из пяти моделей.

В течение всех пяти лет (с 2007 по 2011 гг.) независимой выборки расхождения между фактическими и вычисленными по модели значениями ТСКУМО (рисунок 6) малы и носят случайный характер.

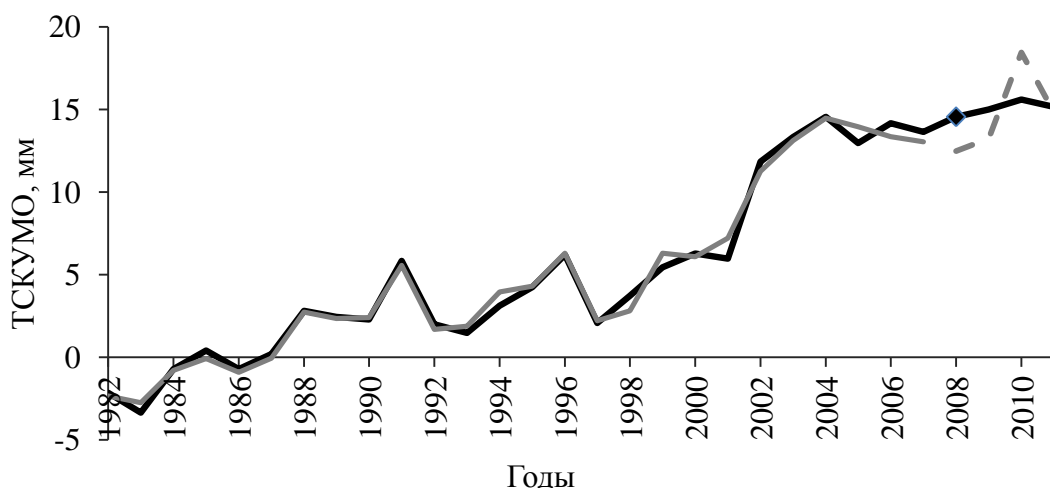


Рисунок 6 – Временной ход термостерического уровня Мирового океана по данным [Levitus et al., 2012] – черная кривая и модель (5) – серая кривая. Темный квадрат – начало расчета аномалий ТСКУМО по независимым данным о ТПО

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Рост теплосодержания Мирового океана за период с 1955 по 2012 гг. не является монотонным и на фоне основного тренда можно выделить промежутки времени, где изменения аномалий ТСМО имеют иной характер. Так, в течение 1955 – 1975 гг. тренд вообще отсутствовал, а интенсивный рост ТСМО в за 1993 – 2003 гг. сменился в 2004 – 2005 гг. его резким уменьшением, вследствие чего было высказано предположение о стабилизации теплосодержания Мирового океана. На основе вейвлет-анализа показано, что наиболее мощным является 23-летнее колебание ТСМО, период которого остается неизменным на протяжении всего рассматриваемого промежутка времени, 15-летнее колебание отмечается лишь в течение 1975 – 2005 гг. При этом оба цикла превышают 5% уровень значимости статистической модели «красный шум».

2. На основе данных реанализа (архив ERSST) и спутниковых измерений (архив OISST) о температуре поверхности океана построены статистические модели с довольно высокой точностью описывающие изменения ТСМО. Во всех случаях стандартная ошибка моделей значительно меньше стандартного отклонения исходного временного ряда аномалий ТСМО. Их важным достоинством является простота, доступность и отсутствие необходимости в использовании глубоководных данных о температуре воды. Полученные по моделям результаты подтверждают вывод о начавшемся в последние годы некотором охлаждении толщи вод Мирового океана.

3. В ТСКУМО выделено три цикла, наиболее мощный из которых (57-летний) не меняется на протяжении всего интервала с 1880 по 2005 гг. Значительно слабее выражен 19 – 20-летний цикл, который присутствует в данных до середины 1980-х годов. Кроме того, можно отметить слабые 6 – 8-летние колебания, наблюдаемые с середины прошлого столетия. Вейвлет-анализ временного ряда ТПО выявил циклы с близкими периодами и небольшим опережением их максимумов относительно ТСКУМО. В частности, для основного 57-летнего цикла уровень отстает от ТПО на 3 – 4 года. Корреляция между вейвлет-коэффициентами на этих сдвигах составляет 0,99.

4. В общем случае формирование термостерической компоненты в конкретный момент времени может быть выражено суммой двух составляющих: «быстрой» и «медленной». «Быстрая» составляющая обусловлена внешним тепловым балансом океана, представляющим собой результирующий вертикальный поток тепла, который определяет колебания теплосодержания деятельного слоя океана. «Медленная» составляющая – нагревание (охлаждение) океана сверху и перераспределение тепла по всей его толще до нижней границы главного термоклина и, в основном, определяется трендовой компонентой.

5. Модель «быстрой» составляющей ТСКУМО была получена на основе 7 предикторов ТПО. Модель на зависимом периоде описывает 83 % дисперсии исходного ряда ТСКУМО, при этом стандартная ошибка составляет 1,28 мм. Стандартная ошибка модели для независимых данных меньше стандартного отклонения исходного временного ряда ТСКУМО. Таким образом, модель, полученная с использованием только 7 предикторов, хорошо описывает «быструю» компоненту ТСКУМО.

6. Построены прогностические модели «медленной» компоненты ТСКУМО с заблаговременностью от 1 года до 8 лет, в каждую из которых вошло по три предиктора. На независимом периоде (2008 – 2014 гг.) модель осредненных на каждом сдвиге τ оценок $h_{медл}$ показала наличие незначимого тренда (-0,18 мм/год), что свидетельствует о замедлении роста ТСКУМО.

7. Предложена прогностическая модель ТСКУМО с заблаговременностью в 1 год, представляющая собой сумму трендовой компоненты и отклонений от нее. Оптимальная прогностическая модель для отклонений от тренда включает в себя 7 предикторов, коэффициент детерминации составляет 0,84, а стандартная ошибка модели 1,35 мм, что меньше стандартного отклонения остаточного ряда (3,22 мм). После наложения трендовой составляющей на 2013 г. прогнозируемый уровень термостерической компоненты составил 17,72 мм, при значении ТСКУМО на 2012 г. равном 16,05 мм.

8. По спутниковым данным о ТПО (архив OISST) получена статистическая модель оценки ТСКУМО, представляющая собой осредненный вариант моделей с количеством предикторов от 3 до 7. В течение всех пяти лет независимой выборки (с 2007 по 2011 гг.) расхождения между фактическими и вычисленными по модели значениями ТСКУМО малы и носят случайный характер, при

этом стандартная ошибка «спрогнозированных» значений меньше стандартной ошибки исходной выборки.

Список публикаций по теме диссертации

Работы в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций:

1. Малинин В.Н., Глок Н.И. К оценке стерических колебаний уровня Мирового океана // Ученые записки РГГМУ. 2009. №10. С. 53-62.
2. Малинин В.Н., Гордеева С. М., Глок Н.И. О возможных изменениях стерической компоненты уровня Мирового океана // Изв. РГО. 2010. Т. 142. Вып. 4. С. 23-32.
3. Глок Н.И., Малинин В.Н. Статистический анализ стерических колебаний уровня Мирового океана// Ученые записки РГГМУ. 2011. № 21. С. 26-36.
4. Глок Н.И., Малинин В.Н. Изменения теплосодержания Мирового океана в период 1955-2009.//Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Том 6, №1 С.32-39.
5. Малинин В.Н., С.М.Гордеева, Н.И. Глок. К оценке теплосодержания Мирового океана по спутниковым данным о температуре поверхностного слоя воды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 201–207.
6. Малинин В. Н., Глок Н.И. Использование спутниковых данных о температуре поверхностного слоя воды для оценки стерических колебаний уровня Мирового океана // Исследование Земли из космоса. 2014. № 2 (в печати).

Публикации в прочих научных изданиях:

7. Малинин В.Н., Глок Н.И. Стерический эффект в колебаниях уровня Мирового океана // Географ. образование и наука в России: история и современное состояние. СПб, 2009, Изд. ВВМ, с. 827-836.
8. Клиге Р.К., Малинин В.Н., Гордеева С.М, Глок Н.И. Факторы изменения уровня океана // Современные глобальные изменения природной среды: М. Научный мир, 2012, С. 302-318.