

В 2010 г. соискатель окончил Севастопольский национальный технический университет (ныне – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет») по специальности «Физика. Биофизика».

Лишаев П.Н. окончил в 2015 г. очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано 04.03.2019 г. Федеральным государственным бюджетным учреждением науки «Морской гидрофизический институт РАН».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН Коротаев Геннадий Константинович работает научным руководителем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

По результатам рассмотрения диссертации Лишаева П.Н. «Восстановление гидрофизических полей Черного моря на основе использования данных альтиметрии и ограниченных контактных измерений» принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы.

Диссертация Лишаева П.Н. посвящена разработке алгоритма восстановления трехмерных полей температуры и солености Черного моря для случаев малого количества контактных измерений.

Для выполнения близких по результатам к реальности диагностических и прогностических расчетов состояния морской среды необходима ассимиляция данных наблюдений в численных моделях динамики моря. Ассимиляция будет эффективной при наличии данных наблюдений в каждом узле расчетной сетки модели. Спутниковые измерения в силу их многочисленности и относительной синхронности представляют собой

подходящий набор данных для этой цели. В диссертационной работе разработан алгоритм совместного анализа и последующего усвоения в численной модели спутниковых и контактных измерений при воспроизведении гидрофизических полей Черного моря для длительного промежутка времени (более 20 лет).

На основе совместного анализа массивов имеющихся контактных измерений и данных альтиметрии установлено существование в Черном море так называемой «базовой» стратификации, в качестве которой были предложены «невозмущенные» профили температуры и солёности (профили, соответствующие значениям альтиметрического уровня моря, лежащим в диапазоне от -1 до 1 см). Показана однопараметрическая зависимость глубин залегания изохалин от уровня моря, а также адиабатичность смещений изохалинных и изотермических поверхностей в слое 100 – 1000 м глубоководной области Черного моря.

На основе представления о наличии «базовой» стратификации был предложен алгоритм восстановления трехмерных полей температуры и солёности (псевдоизмерений) в глубоководной части Черного моря по данным альтиметрии, буев-профилемеров Argo и других контактных измерений. Он основан на эмпирической зависимости между значениями альтиметрического уровня и среднемесячными значениями солёности (температуры). Разработанный алгоритм составил основу для выполнения реанализа состояния Черного моря посредством ассимиляции в модели восстановленных трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солёности за период 1993 – 2012 годов. Методика выполнения реанализа позволяет при значительной экономии машинных ресурсов воспроизводить гидрофизические поля с точностью сопоставимой или выше, чем у других реанализов для данного региона.

В диссертационной работе осуществлено развитие метода адаптивной статистики, которое заключается в следующем. Выполнены оценки типичных дисперсий ошибок прогноза для 20 -летних массивов полей

температуры и солености, полученных в численном расчете по модели без ассимиляции данных измерений. Величина источника для коррекции значений дисперсий ошибок прогноза подбиралась таким образом, чтобы она по порядку величин была сопоставима с горизонтальной адвекцией. При этом наблюдается корреляция между структурами поля течений и поля типичной дисперсии ошибок прогноза температуры (солености).

Диссертация Лишаева П.Н. «Восстановление гидрофизических полей Черного моря на основе использования данных альтиметрии и ограниченных контактных измерений» по объему выполненных исследований, новизне результатов, научному и практическому значению отвечает требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации.

Выбор тематики диссертационной работы проводился совместно с научным руководителем, д. ф.-м. н., профессором, членом-корреспондентом РАН Г.К. Коротаяевым.

Соискателем совместно с научным руководителем обоснована актуальность исследования, поставлена цель работы и сформулированы основные задачи для ее достижения.

Диссертантом выполнен совместный анализ массивов альтиметрических и контактных наблюдений, разработан и реализован алгоритм восстановления трехмерных полей псевдоизмерений, выполнены численные эксперименты и последующий анализ полученных результатов при решении задачи усовершенствования метода адаптивной статистики.

Анализ полученных результатов и их интерпретация проводились соискателем совместно с научным руководителем.

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Поля температуры, солености, уровня моря и скоростей течений, полученные из реанализа гидрофизических полей Черного моря,

сопоставлялись как с данными контактных наблюдений (профили температуры и солености, измеренные буями-профилемерами Argo и CTD-зондами в ходе экспедиционных работ, карты аномалий уровня моря AVISO (<http://www.aviso.oceanobs.com/>), так и с результатами выполненных ранее реанализов гидрофизических полей для исследуемого региона. Был обнаружен эффект распреснения вод Черного моря в верхнем 30-метровом слое в исследуемом интервале времени, что согласуется с данными контактных измерений.

Аналогичный сравнительный анализ проводился для восстановленных трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солености. Были проанализированы пространственная и временная (сезонная, межгодовая) изменчивости восстановленных полей псевдоизмерений. Величины рассчитанных статистических оценок точности (среднеквадратических отклонений) восстановленных полей (при сравнении с данными контактных и дистанционных измерений) сопоставимы или значительно меньше в сравнении с имеющимися на данный момент реанализами для Черного моря.

Научная новизна результатов проведенных исследований.

1) Впервые установлено существование «базовой» стратификации температуры и солености Черного моря и предложена оригинальная методология ее восстановления по данным альтиметрии и контактных измерений.

2) Показана адиабатичность смещений изохалинных и изотермических поверхностей в слое 100 – 1000 м глубоководной области Черного моря.

3) Впервые обоснована однопараметричность зависимости глубин залегания изохалин от уровня моря.

4) Впервые предложен алгоритм восстановления трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солености для Черного моря, основанный на совместном анализе ограниченных контактных измерений и данных альтиметрии.

5) Получил дальнейшее развитие метод адаптивной статистики посредством оценки типичных дисперсий ошибок прогноза температуры и солености для модельного расчета на 20-летний интервал времени (с 1993 по 2012 гг.) без ассимиляции данных контактных измерений и подбора весового коэффициента у источника для коррекции значений дисперсий ошибок прогноза таким образом, чтобы величина горизонтальной адвекции и источника в уравнении переноса-диффузии тепла и соли были сопоставимы по порядку.

6) Обнаружен эффект распреснения вод Черного моря в 1993–2012 годах в верхнем 30-метровом слое и осолонение в более глубоких слоях на основе данных о профилях «базовой» солености и результатов реанализа.

Практическая значимость результатов проведенных исследований.

Предложенный в диссертационной работе оригинальный алгоритм позволяет восстанавливать трехмерные ежесуточные поля псевдоизмерений температуры и солености в морской среде в условиях ограниченности контактных наблюдений. Восстановленные поля псевдоизмерений могут быть использованы в качестве начальных полей как в гидрофизических, так и в междисциплинарных (например, биогеохимических) моделях, а также для коррекции гидрофизических полей в системах диагноза и прогноза.

Разработана методика выполнения ретроспективного анализа гидрофизических полей Черного моря, результаты которого могут быть использованы для анализа вихревой динамики, сезонной и межгодовой изменчивости термохалинных полей с точностью сопоставимой и выше, чем у существующих на данный момент реанализов.

Предложена методология устранения систематической модельной ошибки в межгодовой изменчивости полей температуры и солености Черного моря в приложении к задачам оперативного прогноза состояния морской среды.

Ценность научных работ соискателя.

В настоящее время контактные измерения в различных частях Мирового океана, как и в Черном море, неравномерны как в пространстве, так и во времени и не дают возможности получить цельную картину пространственной изменчивости таких полей как температура и соленость. В тоже время есть спутниковая альтиметрия, позволяющая определить уровенную поверхность моря с высоким временным разрешением. Предложенный в работе алгоритм позволяет сгладить проблему ограниченности данных контактных измерений и получать ежесуточные трехмерные поля температуры и солености с разрешением по пространству как у альтиметрических измерений, что, в свою очередь, дает возможность проводить предварительный анализ пространственной (по горизонтам, слоям и глубине) и временной изменчивости гидрофизических полей, еще до привлечения численного моделирования. Также полученные трехмерные поля псевдоизмерений могут использоваться в численных расчетах (гидродинамических и совместных с биогеохимическими) для задания начальных полей и применяться для корректировки гидрофизических полей на протяжении выполнения численного эксперимента (при ассимиляции температуры/солености), чтобы получить наиболее близкие к измерениям результаты.

Специальность, которой соответствует диссертация.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.6.17 – «океанология», отрасль наук – физико-математические науки.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

По теме диссертации опубликовано в соавторстве 20 научных работ, из них 10 статей в рецензируемых научных журналах и 10 тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях.

Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют 10 работ в рецензируемых научных изданиях [1–10]. В их числе 9 работ [2–10] в

рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрические базы SCOPUS [3, 6, 9, 10] и Web of Science [2–10] и 1 работа [1] в издании, соответствующем п. 10 Постановления Правительства Российской Федерации от 30 июля 2014 г. №-723 «Об особенностях присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий лицам, признанным гражданами Российской Федерации в связи с принятием в Российскую Федерацию Республики Крым и образованием в составе Российской Федерации новых субъектов – Республики Крым и города федерального значения Севастополя».

Статьи в рецензируемых журналах

1. **Лишаев П.Н.**, Коротаяев Г.К., Кныш В.В., Мизюк А.И., Дымова О.А. Восстановление синоптической изменчивости гидрофизических полей Черного моря на основе реанализа за 1980 – 1993 годы // Морской гидрофизический журнал. – 2014. – №5. – С. 49–68.

2. Коротаяев Г.К., **Лишаев П.Н.**, Кныш В.В. Методика анализа данных измерений температуры и солености Черного моря с использованием динамического альтиметрического уровня // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – №2. – С. 26–42. DOI: 10.22449/0233-7584-2015-2-26-42.

(Korotaev G.K., **Lishaev P.N.**, Knysh V.V. Technique of the Black Sea Temperature and Salinity Measurement Data Analysis Using Dynamic Altimetry Level // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2015. – 2. – P. 24–38. DOI: 10.22449/1573-160X-2015-2-24-38).

3. Коротаяев Г.К., **Лишаев П.Н.**, Кныш В.В. Восстановление трехмерных полей солености и температуры Черного моря по данным спутниковых альтиметрических наблюдений // Исследование Земли из космоса. – 2016. – №1–2. – С. 199–212. DOI: 10.7868/S0205961416010073.

(Korotaev G.K., **Lishaev P.N.**, Knysh V.V. Reconstruction of the Three-Dimensional Salinity and Temperature Fields of the Black Sea on the Basis of Satellite Altimetry Measurements // Izvestia. Atmospheric and Oceanic Physics. – 2016. – Vol.52, №9. – P.961–973. DOI: 10.1134/S0001433816090152).

4. Кныш В.В., Коротаев Г.К., **Лишаев П.Н.** Методика использования трехмерных полей температуры и солености Черного моря, восстановленных по малочисленным данным измерений и альтиметрии, в оперативной прогностической модели // Морской гидрофизический журнал. – 2016. – №2. – С. 53–69. DOI: 10.22449/0233-7584-2016-2-53-69.

(Knysh V.V., Korotaev G.K., **Lishaev P.N.** Methodology of Application of the Black Sea Three-Dimensional Temperature and Salinity Fields Reconstructed on the Basis of Altimetry and Scanty Measurements in the Operational Prognostic Model // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2016. – 2. – P. 46–61. DOI: 10.22449/1573-160X-2016-2-46-61).

5. Кныш В.В., **Лишаев П.Н.** Уточнение методики восстановления трехмерных полей солености и температуры Черного моря по редким измерениям и альтиметрии // Морской гидрофизический журнал. – 2016. – №6. – С. 5–17. DOI: 10.22449/0233-7584-2016-6-5-17.

(Knysh V.V., **Lishaev P.N.** Improvement of the Method for Reconstructing the Temperature and Salinity Three-Dimensional Fields of the Black Sea Based on Insufficient Measurements and Altimetry // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2016. – 6. – P. 3–14. DOI: 10.22449/1573-160X-2016-6-3-14).

6. Коротаев Г.К., Саркисян А.С., Кныш В.В., **Лишаев П.Н.** Реанализ сезонной и межгодовой изменчивости полей Черного моря за 1993 – 2012 гг. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2016. – Т.52, №4. – С. 475-487. DOI: 10.7868/S0002351516040076.

(Korotaev G.K., Knysh V.V., **Lishaev P.N.**, Sarkisyan A.S. Reanalysis of Seasonal and Interannual Variability of Black Sea Fields for 1993 – 2012 // Izvestia. Atmospheric and Oceanic Physics. – 2016. – Vol.52, №4. – P. 418-430. DOI: 10.1134/S0001433816040071).

7. Коротаев Г.К., Кныш В.В., **Лишаев П.Н.**, Демышев С.Г. Применение метода адаптивной статистики для реанализа полей Черного моря с ассимиляцией псевдоизмерений температуры и солености в модели // Морской гидрофизический журнал. – 2018. – Т.34, №1. – С. 40–56. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-1-40-56.

(Korotaev G.K., Knysh V.V., **Lishaev P.N.**, Demyshev S.G. Application of the Adaptive Statistics Method for Reanalysis of the Black Sea Fields Including Assimilation of the Temperature and Salinity Pseudo-measurements in the Model // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2018. – 25(1). – P. 36–51. DOI: 10.22449/1573-160X-2018-1-36-51).

8. **Лишаев П.Н.**, Кныш В.В., Коротаев Г.К. Воспроизведение изменчивости уровня и характеристик пикноклина Черного моря на основе метода адаптивной статистики // Морской гидрофизический журнал. – 2018. – Т.34, №4. – С. 271–282. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-4-271–282.

(**Lishaev P.N.**, Knysh V.V., Korotaev G.K. Reproduction of Variability of the Black Sea Level and Pycnocline Characteristics Based on the Adaptive Statistics Method // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2018. – 25(4). – P. 251–261. DOI: 10.22449/1573-160X-2018-4-251-261).

9. **Лишаев П.Н.**, Кныш В.В., Коротаев Г.К. Восстановление температуры и солености в верхнем слое Черного моря по данным псевдоизмерений на нижележащих горизонтах // Морской гидрофизический журнал. – 2019. – Т.35, №2. – С. 114–133. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-2-114-133.

(**Lishaev P.N.**, Knysh V.V., Korotaev G.K. Reconstruction of Temperature and Salinity in the Upper Layer of the Black Sea Using Pseudo-Measurements on the Underlying Horizons // Physical Oceanography, [e-journal]. – 2019. – 26(2). – P. 104–122. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-2-104-122).

10. **Лишаев П.Н.**, Кныш В.В., Коротаев Г.К. Восстановление гидрофизических полей Черного моря с ассимиляцией поверхностной температуры и псевдоизмерений температуры, солености в модели // Морской гидрофизический журнал. – 2020. – Т.36, №5. – С. 485–500. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-5-485-500.

(**Lishaev P.N.**, Knysh V.V., Korotaev G.K., Reconstructing the Black Sea Hydrophysical Fields Including Assimilation of the Sea Surface Temperature, and the Temperature and Salinity Pseudo-Measurements in the Model // Physical

Oceanography, [e-journal]. – 2020. – 27(5) – P. 445-459. DOI: 10.22449/1573-160X-2020-5-445-459).

Цитирования материалов и отдельных результатов других авторов в диссертации оформлены соответствующим образом. Результаты диссертационной работы в полной мере опубликованы в рецензируемых научных изданиях, удовлетворяющих требованиям ВАК Российской Федерации.

Диссертация «Восстановление гидрофизических полей Черного моря на основе использования данных альтиметрии и ограниченных контактных измерений» Лишаева Павла Николаевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17 – «океанология».

Заключение принято на заседании Общественного научного семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН».

Присутствовало на заседании 32 члена Общественного научного семинара. Результаты голосования: «за» – 32 человека, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек, протокол № 14 от 30 ноября 2022 г.

Заместитель председателя
Общественного научного семинара
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федеральный исследовательский
центр «Морской гидрофизический институт РАН»,
доктор физико-математических наук  Демышев Сергей Германович

Ученый секретарь
Общественного научного семинара
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федеральный исследовательский
центр «Морской гидрофизический институт РАН»,
кандидат физико-математических наук,
ученый секретарь  Алексеев Дмитрий Владимирович

