

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-158-164  
УДК 621.384.3+551.46.08

С.С. Зенченко

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОМЕХИ В ПРИВОДНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЗОНДИРОВАНИИ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ИНФРАКРАСНЫХ ВИЗИРНЫХ КАНАЛОВ И УСТРОЙСТВ

**Объект и цель научной работы.** Объектом исследования является обоснование особенностей проявлений поля температуры на границе раздела «вода – воздух» (поверхностной пленке воды). Цель – изучение взаимосвязи динамики изменения влагосодержания приводного слоя и свойств границы раздела двух сред.

**Материалы и методы.** Применены тепловизионные приборы инфракрасного диапазона с обеспечением одновременного сопутствующего контроля параметров приводного слоя воздуха с применением многоканального термогигрометра и контактных датчиков температуры, размещенных в водной среде и в приводном слое атмосферы. Используются различные по масштабам и насыщенности внешних воздействующих факторов лабораторные установки и открытый опытовый бассейн.

**Основные результаты.** Проведен последовательный анализ этапов измерений характеристик поверхностной пленки воды, особенностей структуры поля температуры в лабораторных и полунатурных условиях в ИК-диапазоне спектра, изменений влагосодержания приводного слоя при различных вариациях состояния поверхностной пленки воды в процессе взаимодействия двух сред. Осуществлены замеры процесса разномасштабного образования радиационного тумана, участвующего в возможном формировании ложного и истинного видимого горизонта в качестве одной из помех в «прохождении» ИК-излучения до каналов регистрации. Проведены измерения параметров помехи и особенностей ее проявления.

**Заключение.** На основе анализа и экспериментальных исследований подтверждено существование разномасштабных аномальных образований влагосодержания, обеспечивающих вариации радиационной температуры.

**Ключевые слова:** тепловизионные приборы, поверхностная пленка воды, теплообмен, радиационная температура, влагосодержание, морская поверхность, тепловое поле, излучение.

*Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-158-164  
UDC 621.384.3+551.46.08

S.S. Zenchenko

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## GENERATION OF INTERFERENCE IN THE SURFACE LAYER AT HORIZONTAL SOUNDING OF SEA SURFACE BY INFRARED SIGHT CHANNELS AND DEVICES

**Object and purpose of research.** The object of investigation is specific temperatures at the water/air interface (skin layer of water). The purpose is to study the interrelation of dynamics in humidity variations of surface atmospheric layer and particulars of the media interface.

**Materials and methods.** Infrared thermal imagers are employed with monitoring of the parameters of atmospheric layer adjacent to ocean surface using a multi-channel thermal hygrometer and contact temperature sensors placed in water and near-water air layer. Laboratory rigs of different scales simulating various levels of external factors and an open water basin were used.

**Main results.** Consistent analysis is done regarding phase-wise measurement of skin water layer characteristics, specific structure of temperature field in IR band of spectrum under laboratory and large-scale conditions, variations of humidity content at different state of skin water layer in the process of interaction between two media. Measurements of the radiation fog

*Для цитирования:* Зенченко С.С. Формирование помехи в приводном слое атмосферы при горизонтальном зондировании морской поверхности с помощью инфракрасных визирных каналов и устройств. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 2(404): 158–164.

*For citations:* Zenchenko S.S. Generation of interference in the surface layer at horizontal sounding of sea surface by infrared sight channels and devices. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 2(404): 158–164 (in Russian).

of different scales are taken, which possibly forms the false and real horizons being one of the interferences for transmission of IR radiation to recording channels. Parameters and specific manifestation of this interference are measured.

**Conclusion.** Based on the analysis and experiments it is confirmed that there are abnormal localizations of humidity content of different scales, which produce radiation temperature variations.

**Keywords:** IR imagers, skin water layer, heat and mass exchange, radiation temperature, humidity content, sea surface, thermal field, radiation.

*The author declares no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

Морские визирные инфракрасные (ИК) каналы и устройства являются самостоятельными приборами либо в сочетании с оптическими каналами составляют комплексные системы, обеспечивающие двойной контроль: фиксацию местоположения удаленного источника сигнала и передачу информации для дальнейшей количественной оценки дистанции с помощью лазерного дальномера.

Как показывает анализ данных, передаваемая информация не всегда может быть полностью достоверной. В процессе настройки ИК-каналов необходима корректировка, поскольку при механическом совпадении визирных ИК-каналов и каналов видимого диапазона возможно несовпадение с лучом лазерного дальномера из-за изменений траектории оптического луча.

Длительная проблема поиска такого несовпадения привела к предположению о влиянии на показания ИК-каналов определенной помехи. Если рассмотреть схему применения указанных выше приборов, то на начальном положении прибора, соответствующем максимальному удалению от морской поверхности, распространяется почти горизонтальная линия визирования. Эта линия на значительном удалении, соответствующем видимому горизонту и положению источника сигнала, находится на границе раздела двух сред.

В этой связи необходимо уточнение особенности формирования ИК-излучения и восприимчивости прибором этого поля при зондировании морской поверхности под большими углами визирования. Так, в работе [1] делается предположение, что при наблюдении морской поверхности на больших углах визирования происходят значительные изменения сигнала в ИК-канале, который автор связывает с существованием аэрозоля в приземном слое атмосферы. Однако подтверждение этого обстоятельства не получено ввиду отсутствия таких экспериментальных данных.

Действительно, прямых измерений этого эффекта не было. Но можно отметить некоторые обстоятельства исследований, которые показывают особенности применения наклонного зондирования

морской поверхности. Так, многократные экспериментальные исследования [2–3] изменений теплового излучения в ИК-диапазоне при вертикальном и наклонном зондировании системы «море – атмосфера» показали существенное влияние отраженной составляющей теплового излучения при больших углах падения (70–90°). При этом слабые изменения неровности поверхности усиливались значительным влиянием излучающей способности неба с различной облачностью.

Дополнительно можно рассмотреть данные измерений при сканировании вдоль профиля фронта распространения мелкомасштабной ветровой ряби и вдоль фронта крупной волны с ветровой рябью [4–5]. Различия абсолютного значения сигнала (радиационной температуры) при измерениях в реальном масштабе времени отличались почти в 2 раза. Кроме того измерения взволнованной водной поверхности посредством сканирования по углу визирования вдоль фронта волны и навстречу ему установили модуляцию теплового поля волновой структурой. При этом в первом случае в поле зрения попадали гребни и впадина волны, а во втором – только гребни крупного волнения (из-за эффекта затенения). Значения радиационной температуры отличались в 1,5 раза. Это может быть связано с различным состоянием границы раздела из-за растяжения и сжатия массы воды на гребнях и впадине волны и различным состоянием поверхностного натяжения на профиле волны.

Несомненно, данные обстоятельства накладывают влияние на состояние теплового поля границы раздела «вода – воздух». Промодулированный волнением сигнал и его различие на условном гребне и впадине соответствует (частично) различию в величинах температуры поверхности на структурной форме волны. Свой вклад должна вносить форма и структура поверхности, а также проходимость (прозрачность) воздушной среды в ИК-диапазоне. Сильным препятствием и поглотителем ИК-излучения могут быть туман, брызги воды, воздушные массы с сильно насыщенной влагой, частицы загрязняющих взвесей и т.п.

При этом уровень регистрируемой излучательной способности морской поверхности будет зави-

сеть от уровня ее теплового излучения, на которое наложится влияние отраженного излучения небосвода. Поскольку все аномальные отклонения сигнала и предполагаемая помеха находятся в приводном слое атмосферы, то в процессе формирования помехи участвуют водная поверхность и воздушная среда. Поэтому в качестве возможной грубой компенсации такой помехи принимаются практические поправки, вводимые посредством контроля разности температуры ( $\Delta T$ ) воды ( $T\omega$ ) и воздуха ( $Ta$ ) в пределах масштабов удаления линии горизонтального визирования надводного пространства, которая при большой дальности фиксации источника максимально приближается к границе раздела «вода – воздух». В дальнейшем параметр  $\Delta T$  может быть принят в качестве опорного.

Этот показатель может быть связан с другими параметрами, например со значениями или вариациями радиационной температуры, или величинами угловых отклонений луча, обеспечивающими рефракцию электромагнитных волн при прохождении приводного слоя.

Если взять за основу эти факты, то можно констатировать, что названный параметр  $\Delta T = T\omega - Ta$  характеризует процесс теплообмена на границе раздела «вода – воздух» [6]. И то, что используется такой параметр, вполне понятно, т.к. он является общим, входящим в формулы определения затрат тепла на испарение и контактный обмен между названными субстанциями. Поскольку из этих потерь тепла испарение является всегда преобладающим, то изменение влагосодержания приводного слоя может являться определяющим фактором, влияющим на искажения показаний ИК-канала.

Кроме того различный знак значений  $\Delta T$  будет свидетельствовать в пользу реальных процессов, происходящих на границе раздела и подтверждающих выдвигаемые предположения. Также можно предположить, что важным, если не определяющим, может быть связь значений  $\Delta T = T\omega - Ta$  с характеристиками и параметрами самой помехи. К ним должны быть отнесены: размеры, форма (частиц), скорость движения и частота появления и т.п. В этом случае появится возможность для более точной корректировки.

## Физика процессов

### Physics of processes

Проведенные многочисленные исследования теплообмена [6–8] показали, что на границе раздела «вода – воздух» формируется тонкая поверх-

ностная пленка воды (ППВ), температура которой может быть как ниже, так и выше по сравнению с температурой основной нижележащей массы воды на глубине квазиизотермического распределения. При принятых в гидрофизике и океанологии понятиях таким образованиям присвоены названия, соответственно, холодной и теплой ППВ. При этом сама ППВ достигает по толщине нескольких миллиметров и отличается значительными градиентами температуры (до 1000 °С/м).

Будучи в одном случае гидростатически неустойчивым образованием на морской поверхности, а в другом – более устойчивым, эти субстанции называются «лакмусовыми бумажками», которые фиксируют все процессы взаимодействия двух сред. Эти процессы связаны с теплообменом, влиянием ветрового обдува и волнением морской поверхности, а также ее нагревом из-за солнечной радиации и длинноволнового эффективного излучения от небосвода с различным состоянием облачности.

Ключевым элементом регулирования процессов во всех проявлениях в ППВ является поверхностное натяжение, за счет которого эта пленка удерживается на морской поверхности при изменении ветрового давления, температуры, горизонтальных сил и течений. Основным спусковым рычагом приведения в действие процессов при любых перечисленных возмущениях является термокапиллярная конвекция вследствие появления горизонтальной неоднородности температуры морской поверхности, которая способствует обрушению холодных масс воды и их стеканию вглубь жидкости в одном случае. В другом случае, при более устойчивом начальном состоянии, происходят перераспределение сил поверхностного натяжения, образование волновых процессов, изменение свойств и инверсии состояния до неустойчивого, как для холодной ППВ.

При этом все изменения связаны с перераспределением тепла, что приводит при отрицательном  $\Delta T$  к вбросу в приводный слой дополнительных паров влаги, а при положительном  $\Delta T$  – к осушению воздуха. Дальнейшее развитие изменения влагосодержания – это изменение стратификации и плотности приводного слоя, и само появление физических материализованных капель влаги способствует искажению распространения теплового излучения, подчиняющегося законам оптики.

В процессе рассмотрения гипотезы не включены такие техногенные процессы, как апвеллинг крупномасштабных масс воды из глубин к морской поверхности или апвеллинг воздушных масс и интенсивный подъем пузырьков воздуха, захватыва-

ющих массы глубинной воды. Они очевидны по своей сути в ярко выраженных изменениях влагосодержания приводного слоя, и это еще раз подталкивает к необходимости учета влагосодержания в атмосфере.

## Экспериментальные обоснования

### Experimental validation

В качестве базы для экспериментального доказательства происходящего на границе раздела двух сред явления должно быть:

- подтверждение исходного состояния морской поверхности в виде существования локальных и масштабных зон неоднородности температуры, находящихся в динамическом равновесии и при появлении возмущений к запуску перечисленных выше процессов;
- характер проявлений различных по свойствам и состоянию ППВ, возможность их воспроизведения или моделирования;
- подбор возмущающих факторов (уровень возмущения, продолжительность и т.п.), обеспечивающих моделирование контролируемого изменения влагосодержания приводного слоя;
- регистрация процессов образования влагосодержания по ИК-каналу.

## Используемая аппаратура

### Instrumentation

Полный набор аппаратуры должен обеспечивать одновременный контроль происходящих процессов в приводном слое атмосферы и на границе раздела двух сред.

В качестве параметров приводного слоя атмосферы необходимо измерять температуру воздуха на нескольких горизонтах, влажность, скорость ветра, облачность атмосферы и тепловое излучение небосвода, солнечную радиацию и т.п.

Для границы раздела двух сред желательно иметь информацию о состоянии температуры воды в квазиизотермическом слое, температуру на самой поверхности, скорость течений и параметры волнения, абсолютные значения радиационной температуры морской поверхности и контраст, вызванный естественными и искусственными вариациями возмущений, влияющих на теплообмен на границе раздела двух сред.

При этом объем и длительность измерений должны быть настолько большими, продолжи-

тельными и непрерывными, чтобы «поймать» экстремальные моменты. Понятно, что при желании контроля морской поверхности большой масштабом зафиксировать такой момент может быть проблематичным, т.к. он может носить локальный характер.

По этой причине весь ассортимент желаний должен быть однозначно переадресован для лабораторных условий, где применяется упрощенный подход. В таких условиях существует возможность избежать нестационарного влияния небосвода и облаков, волнения поверхности. Можно моделировать различное состояние границы раздела двух сред, детально осуществлять контроль поля температуры в ППВ по ИК-каналам. Посредством варьирования различных параметров можно обеспечить прохождение достаточного диапазона состояний, включающих и ожидаемые эффекты.

Учитывая, что лабораторные условия связаны с ограниченными масштабами водных объемов, в которых совместное применение дистанционных каналов должно быть разнесено по площади с применением контактных средств, решение задач может быть найдено посредством разделения исследований на самостоятельные этапы с последующей сшивкой результатов, проведенных в одинаковых условиях.

С учетом принятых допущений, применение лабораторных условий позволило ограничить перечень необходимой для исследований аппаратуры. В него вошли:

- многоканальный термогигрометр, обеспечивающий измерения относительной влажности, точки росы и температуры воздуха в тонких слоях приводного пространства;
- тепловизионная аппаратура с чувствительностью в ИК-диапазоне спектра 7–14 мкм для контроля параметров ППВ в пределах десятков микрометров ее толщины;
- контактные датчики температуры, установленные на одинаковых удалениях по обе стороны от границы раздела «вода – воздух», соответствующих квазиизотермическим распределениям температуры.

Моделирование различного состояния ППВ осуществлялось созданием и варьированием определенных соотношений температуры воды и воздуха.

Искусственное влияние на состояние ППВ оказывалось посредством генерации малых возмущений акустического воздействия из глубины на границу раздела и создания на свободной поверхности (СП) горизонтальных ламинарных течений, обеспе-

чивающих появление и подъем к СП масс нижележащих слоев воды с отличной от поверхности температурой. Это обеспечивало одновременно запуск термокапиллярной конвекции и изменение поверхностного натяжения.

## Результаты исследований

### Study results

Исследования были разбиты на этапы. На первом этапе приобретался навык воспроизведения различных типов ППВ и наблюдалась естественная изменчивость, связанная с развитием естественной термокапиллярной конвекции. Подробные данные представлены в работе [7]. Анализ этих данных установил различный характер проявления холодной ППВ (рис. 1а, см. вклейку) и теплой ППВ (рис. 1б, см. вклейку). Это различие определяется видом теплового поля свободной поверхности.

Так, для условий холодной ППВ наблюдается ячеистый характер проявлений на поверхности из теплых и холодных областей, которые находятся в некотором динамическом равновесии определенное время. При этом идет процесс взаимодействия между этими областями посредством взаимобмена водными потоками и образований течений жидкости. Одновременно внутри каждой зоны идут постоянная переориентация и видоизменение (что приводит к разделению областей на более мелкие), укрупнение более теплых областей, исчезновение самых холодных с образованием в моменты инверсии вихрей.

В противовес этому состоянию, для условий теплой ППВ такая ячеистая структура не является типичной. Поле температуры более стабильно по температуре и размерам. Естественные конвективные вариации отличаются более интенсивными скоростями течений, обеспечивающими быстрое восстановление устойчивого состояния.

В связи с полученными данными возникал вопрос о влиянии неучтенных вариаций ветрового обдува, излучения небосвода и других составляющих теплообмена на границе раздела двух сред. Поэтому второй этап включал исследование естественной изменчивости поля температуры в полунатурных условиях открытого опытового бассейна (ООБ), имеющего размеры площади 180×70 м с набором всех составляющих теплообмена. Эти данные детально рассмотрены в работе [8].

Как показали исследования, при наличии холодной ППВ сохраняется ячеистый характер поля

температуры (рис. 2, см. вклейку) даже в условиях ветрового обдува и волнения СП. При этом размеры аномальных областей в ООБ изменяются в пределах от 70 до 250 мм и отличаются от данных измерений в лабораторных условиях. Там линейные размеры зон изменялись в диапазоне от 20 мм до 100 мм для теплой ППВ и не превышали 50 мм для условий холодной ППВ.

Следующим этапом исследований явилось изучение динамики теплового поля при искусственном влиянии на характер конвекции и поверхностное натяжение. Результаты описаны в работе [9]. Основной вывод заключался в отклике приводного слоя на изменения процессов термокапиллярной конвекции и параметры поверхностного натяжения, который заключался в изменении насыщения влаги приводного слоя из-за вариаций теплового поля поверхности и ее ячеистой структуры. Изменения уровня (относительной влажности) регистрировались непосредственно многоканальным термогигрометром.

Эти показания были коррелированы с состоянием ППВ (перепадом температуры в ней), поскольку при заданных соотношениях температуры воды и воздуха и, следовательно, интенсивности теплообмена, происходила перестройка ППВ от начальных до максимально возможных параметров. На рис. 3 (см. вклейку) показан момент отклика приводного слоя и показаний влажности для начального меньшего значения перепада температуры в ППВ и для установившегося состояния ППВ, соответствующего предельному состоянию теплообмена на границе двух сред.

Наконец, четвертый этап был посвящен исследованиям ИК-поля СП тепловизионными средствами с целью возможной регистрации моментов влагообразования (тумана) или проявлений точки росы. Эти проявления наблюдались в момент инверсии ППВ. Причем исчезновение теплых аномалий сопровождалось образованием вихрей правого вращения (рис. 4, см. вклейку), при исчезновении холодных областей вихри имеют левое вращение (рис. 5, см. вклейку).

Наибольшая повторяемость появления тумана или выделения влаги поверхностью наблюдались при исчезновении теплых областей и образовании ярко выраженных вихрей (рис. 4, 5). Для исчезновения холодных областей оказалось более характерным появление одиночных капель тумана или их небольшой группы. При этом скорость образования туманного облака и его распространение в приводном слое оказались настолько большими,

что быстрое действие тепловизионной техники не всегда оказалось достаточным, чтобы это зарегистрировать.

При использовании максимальной частоты кадров 100 Гц удалось отследить некоторые процессы, представленные на рис. 6 и 7 (см. вклейку). При этом на рис. 6 приведены результаты регистрации почти одиночных образований капель тумана. На рис. 7 показаны трехмерные тепловые поля капли для различных сечений, которые показывают, что форма капли имеет достаточно сложную форму, поскольку она находится в движении в определенных изменяющихся условиях.

При конкретных условиях проведения экспериментов ( $\Delta T = 30,2 - 25 = 5,2$  °C), соответствующих холодной ППВ, величина максимальной температуры в капле, отделившейся из теплой области поверхности, составила 28,4 °C, отличие от средней температуры окружающего фона достигало – 0,24 °C. При этом температура материнской области, с которой произошло отделение капли, составляло 28,9 °C. Размеры капли тумана в поперечном сечении изменялись от 1 до 1,5 мм.

На рис. 8 (см. вклейку) показано образование и динамика областей поля водного тумана в виде расходящихся концентрических колец (радиационного тумана) относительно некоторого центра, соответствующего координатам места исчезнувшего вихревого образования. При этом скорость движения облаков тумана от указанного центра составила порядка 50 мм/с. Условия эксперимента соответствовали значению параметра  $\Delta T = 32,8 - 29 = 3,8$  °C.

## Выводы

### Conclusion

Таким образом, проведенные исследования показали возможность образования в приводном слое атмосферы водного туманного облака, формирующего аномальную область с контрастом радиационной температуры.

Результаты модельных исследований позволяют предположить, что в реальных морских условиях будет существовать больший масштабный эффект из-за увеличенных размеров теплых и холодных зон на границе раздела двух сред. Это может служить достаточным обстоятельством, определяющим формирование ложного и истинного видимого горизонта.

Все экспериментальные данные получены при использовании ИК-канала тепловизионной техники. Поскольку оптические визирные каналы могут

обладать более высокой разрешающей способностью, это может повлиять на количественные показатели радиационного контраста и геометрические отклонения оптического луча во времени и в пространстве.

## Список использованной литературы

1. *Иванов Д.В.* Статистика инфракрасного излучения морской поверхности и ее применение для интерпретации данных дистанционного зондирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.07 / ФГУП Всероссийский научный центр «Государственный оптический институт» им. С.И. Вавилова. Санкт-Петербург, 2001. 150 с.
2. *Зенченко С.С., Поварков В.И., Самков В.М.* Угловой и многоспектральный метод измерения характеристик морской поверхности в оптическом диапазоне спектра // Оптика моря и атмосферы: тезисы докладов X Пленума Рабочей группы по Оптике океана. Ленинград, 1988. С. 414–415.
3. *Зенченко С.С., Самков В.М.* Особенности использования дистанционной аппаратуры при измерении температуры поверхности океана // Проблемы метрологии гидрофизических измерений: тезисы докладов Всесоюз. конф. Москва: ВНИИФТРИ, 1990.
4. *Гаврилов Д.С., Зенченко С.С., Самков В.М.* Результаты угловых и многоспектральных измерений радиационной температуры взволнованной морской поверхности // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды Всерос. конференции. Санкт-Петербург, 2016. С. 151–153.
5. *Zenchenko S.S., Gorbatskiy V.V., Litvin A.D.* Molding and optimization of experimental hydrophysical complexes for applied tasks using laboratory and large-scale test facilities // Navy and Shipbuilding Nowadays (NSN'2015): proceedings of 8<sup>th</sup> int. conference. St. Petersburg: Krylov State Research Centre, 2015. P. 218–224.
6. *Краус Е.В.* Взаимодействие атмосферы и океана. Ленинград: Гидрометеиздат, 1976. 295 с.
7. *Зенченко С.С.* Исследование динамики поверхностной пленки воды при различных условиях теплообмена на границе раздела «вода – воздух» // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 2(384). С. 112–120.
8. *Зенченко С.С.* Методы и результаты эффективного применения современных тепловизионных средств измерения гидрофизических процессов // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2021. Вып. 2(396). С. 134–138. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-134-138.
9. *Зенченко С.С.* Особенность отклика приводного слоя воздуха на локальные и масштабные вариации поля

температуры границы раздела «вода – воздух» // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. Вып. 1(395). С. 155–161. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-395-155-161.

## References

1. *Ivanov D.V.* Statistics of infrared radiation from sea surface and its application for interpretation of remote probing data: dissertation of Candidate of Technical Sciences : 05.11.07 /JSC “Research and Production Corporation S.I. Vavilova”, 2001. 150 p. (*in Russian*).
2. *Zenchenko S.S., Povarkov V.I., Samkov V.M.* Angular and multispectral method of measuring characteristics of the sea surface in the optical range of spectrum // Sea and atmospheric optics: abstracts of the reports of the X Plenum of the Working Group on Ocean Optics. Leningrad, 1988. P. 414–415 (*in Russian*).
3. *Zenchenko S.S., Samkov V.M.* Specifics of remote instrumentation application in measuring ocean surface temperature. Metrology problems of hydrophysical measurements: abstracts of the reports of All-Soviet National Conference Moscow : VNIIFTRI, 1990 (*in Russian*).
4. *Gavrilov D.S., Zenchenko S.S., Samkov V.M.* Results of angular and multispectral method of measuring wavy marine surface. Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics: proceedings of the All-Russian National Conference. St. Petersburg, 2016. P. 151–153 (*in Russian*).
5. *Zenchenko S.S., Gorbatskiy V.V., Litvin A.D.* Molding and optimization of experimental hydrophysical complexes for applied tasks using laboratory and large-scale test facilities // Navy and Shipbuilding Nowa-

- days (NSN'2015) : proceedings of 8<sup>th</sup> int. conference. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2015. P. 218–224.
6. *Kraus E.B.* Atmosphere-ocean interaction. Leningrad : Hydrometeoizdat, 1976. 295 p. (*in Russian*).
7. *Zenchenko S.S.* Dynamic studies of surface water film in different heat & mass exchange conditions at water-air boundary // Transactions of Krylov Central Research Institute. 2018. Vol. 2(384). P. 112–120 (*in Russian*).
8. *Zenchenko S.S.* Methods and results of effective application of modern infra-red imaging technologies for measuring hydrophysical processes // Transactions of Krylov State Research Centre. Vol. 2(396). P. 134–138. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-134-138 (*in Russian*).
9. *Zenchenko S.S.* Peculiarities of surface layer response to local and global variations of temperature field at water-air boundary // Transactions of Krylov State Research Centre. 2021. Vol. 1(395). P. 155–161. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-395-155-161 (*in Russian*).

---

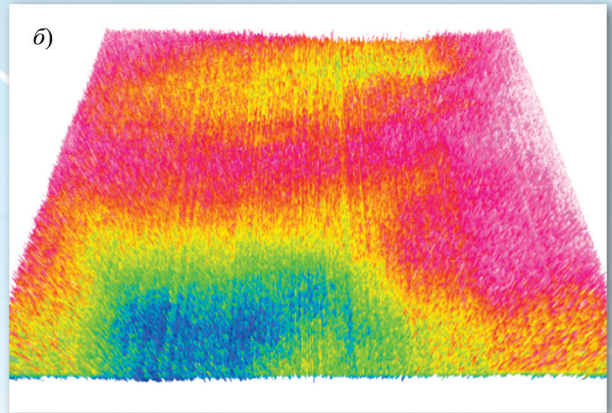
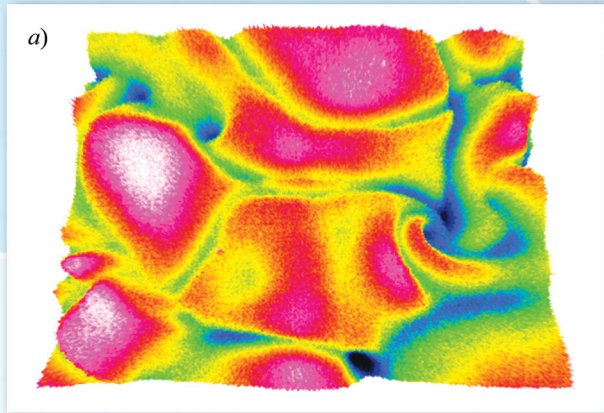
## Сведения об авторе

*Зенченко Сергей Сергеевич*, к.т.н., начальник 703 сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-96-14. E-mail: zenchenko50@bk.ru.

## About the author

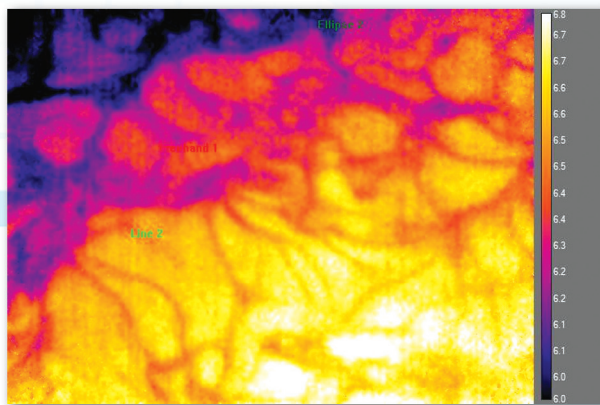
*Sergey S. Zenchenko*, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector of Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-96-14. E-mail: zenchenko50@bk.ru.

Поступила / Received: 02.03.23  
Принята в печать / Accepted: 02.06.23  
© Зенченко С.С., 2023



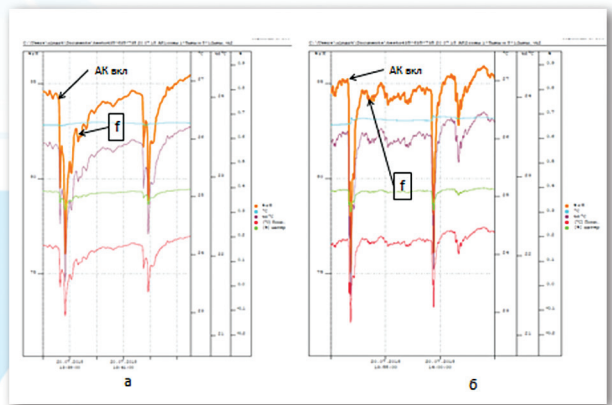
**Рис. 1.** Типичное трехмерное представление теплового поля водной поверхности для условия холодной поверхностной пленки воды (а) и теплой поверхностной пленки воды (б)

**Fig. 1.** Typical 3D representation of water surface thermal field for cold skin water layer (a) and warm skin water layer (b)



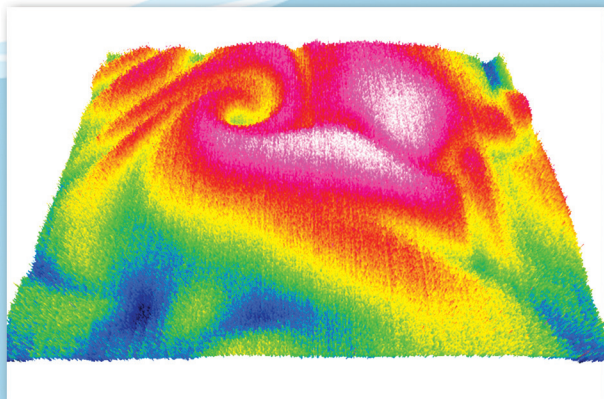
**Рис. 2.** Ячеистое строение водной поверхности для полунатурных условий

**Fig. 2.** Cell structure of water surface for large scale conditions

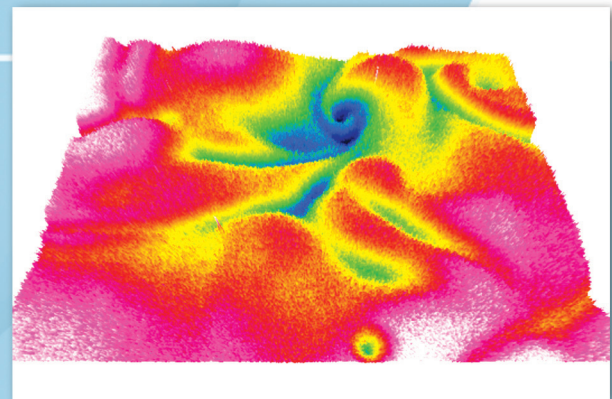


**Рис. 3.** Изменение влажности в приводном слое при меньшем значении перепада температуры в поверхностной пленке воды (а) и при установившемся ее состоянии (б)

**Fig. 3.** Humidity variations in near-water air layer at lower temperature difference in skin water layer (a) and steady state of skin water layer (b)

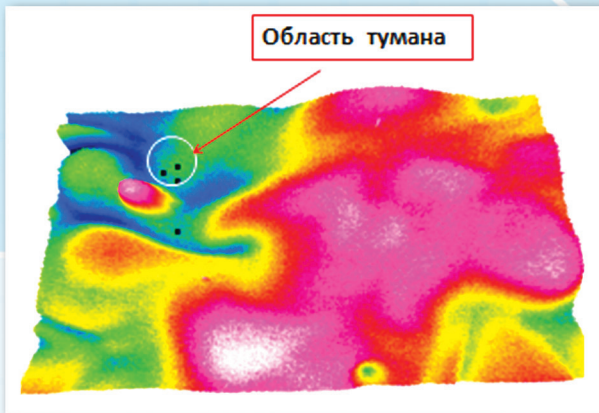


**Рис. 4.** Вихри инверсии теплых областей  
**Fig. 4.** Eddies of warm field inversion



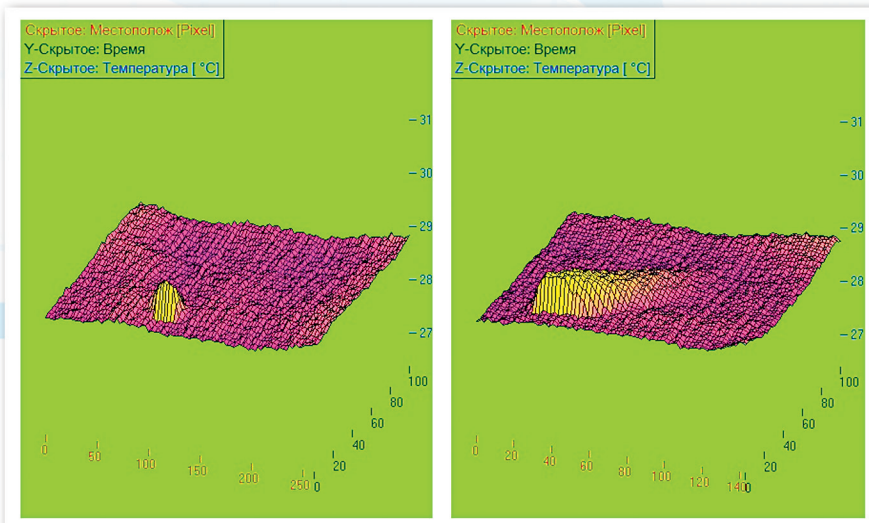
**Рис. 5.** Вихри инверсии холодных областей  
**Fig. 5.** Eddies of cold field inversion





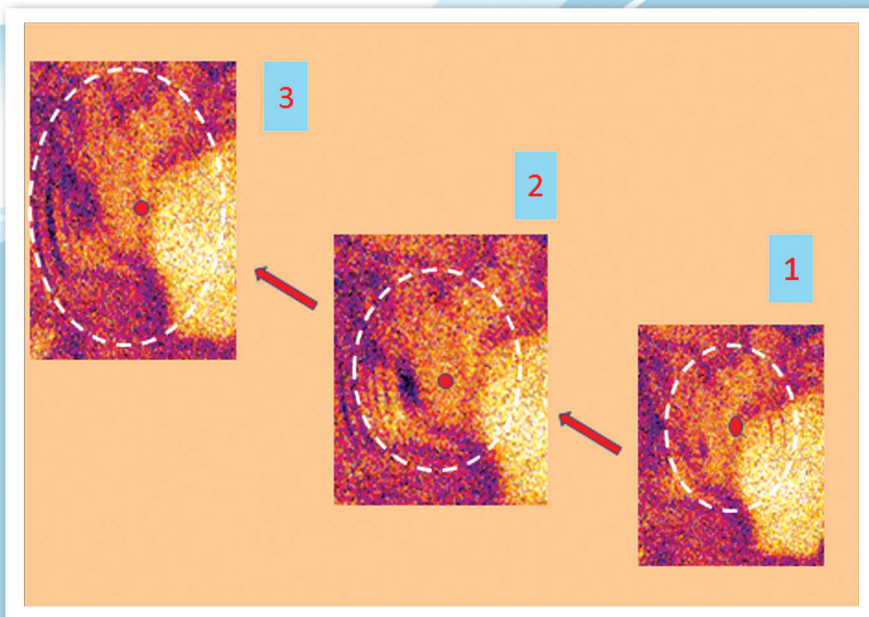
**Рис. 6.** Момент регистрации капель тумана

**Fig. 6.** Instant of fog mist recording



**Рис. 7.** Трехмерное представление капли тумана в различных сечениях

**Fig. 7.** 3D representation of fog mist in different sections



**Рис. 8.** Динамика образования поля радиационного тумана

**Fig. 8.** Dynamics of forming the radiation fog field