

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2, 2022

Использование космической информации о Земле

- Определение характеристик естественных нефтепроявлений и их подводных источников по данным дистанционного зондирования
Е. Р. Матросова, В. Н. Ходаева, А. Ю. Иванов 3
- Изменение уровня моря и геострофических течений в Восточно-Сибирском море и море Лаптевых под влиянием ветра и стока реки Лены
А. Г. Андреев, И. И. Пупко 28
- Изменчивость площади и формы Бенгельского апвеллинга в 1985–2017 гг. и ее связь с динамическими характеристиками по спутниковым измерениям
В. А. Павлушин, А. А. Кубряков 38
- Спутниковая оценка некоторых параметров окружающей среды в районе угольных разрезов Искитима в 2013–2020 годах
Н. В. Родионова 52
-

Физические основы исследования Земли из космоса

- Коэффициент поглощения холодного облачного аэрозоля на частотах 100–300 ГГц
Г. С. Бордонский, А. О. Орлов 63
-

Методы и средства обработки и интерпретации космической информации

- Обзор современных облачных платформ обработки и аналитики данных ДЗЗ и информационных продуктов на их основе
А. А. Емельянов, М. В. Ерешко, О. С. Сизов, А. В. Борисов 72
- Двухканальный алгоритм определения аэрозольной оптической толщины над морской поверхностью по данным прибора МСУ-МР спутника “Метеор-М” № 2
М. О. Кучма, Е. И. Холодов, Ю. А. Амельченко 88
-

Юбилей

- К 85-летию Анатолия Алексеевича Бузникова 95
-
-

Contents

No. 2, 2022

Utilization of the Earth Space Data

- Determination of Characteristics of Natural Oil Seeps and Their Underwater Sources from Remote Sensing Data
E. R. Matrosova, V. N. Khodaeva, A. Yu. Ivanov 3
- Changes in Sea Level and Geostrophic Currents in the East Siberian Sea and the Laptev Sea under the Influence of Wind and Runoff of the Lena River
A. G. Andreev, I. I. Pipko 28
- Variability of the Area and Shape of the Benguela Upwelling in 1985–2017 and Its Relationship with Dynamic Characteristics from Satellite Measurements
V. A. Pavlushin, A. A. Kubryakov 38
- Satellite Assessment of Some Environmental Parameters in the Area of the Iskitim Coal Mines in 2013–2020
N. V. Rodionova 52
-

Earth Research from Space Physical Ground

- Absorption Coefficient of Cold Cloudy Aerosol at Frequencies of 100...300 GHz
G. S. Bordonskiy, A. O. Orlov 63
-

Methods and Means of Space Data Processing and Interpretation

- Review of Current Cloud Platforms for Processing and Analyzing Remote Sensing Data and Information Products Based on Them
A. A. Emelyanov, M. V. Ereshko, O. S. Sizov, A. V. Borisov 72
- Two-Channel Algorithm for Determining the Aerosol Optical Thickness above the Sea Surface Using the MSU-MR Instrument of the Meteor-M No. 2 Satellite
M. O. Kuchma, E. I. Kholodov, Y. A. Amel'chenko 88
-

Anniversaries

- Anatoly Alekseevich Buznikov (80th Anniversary) 95
-
-

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЕСТЕСТВЕННЫХ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ И ИХ ПОДВОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2022 г. Е. Р. Матросова^{а, *}, В. Н. Ходаева^а, А. Ю. Иванов^{а, б}

^аНаучно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

^бИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*E-mail: ekaterina.r.matrosova@gmail.com

Поступила в редакцию 02.12.2021 г.

Рассматриваются и систематизируются основные значимые параметры естественных нефтепроявлений и возможности их определения по данным космической радиолокации и оптической съемки. Показано, что анализ временных серий оптических и радиолокационных изображений позволяет определить основные/характерные параметры естественных нефтепроявлений, с помощью которых становится возможным узнать местоположение их подводных источников, интенсивность и объемы выбросов, геолого-геофизическое состояние и в некоторой степени перспективы нефтегазоносности региона. Обсуждаются возможности, ограничения и перспективы использования данных ДЗЗ для рассматриваемых задач. Обзорный характер работы позволил рассмотреть современные методы и результаты исследований естественных нефтепроявлений с помощью данных дистанционного зондирования.

Ключевые слова: естественные нефтепроявления, морская поверхность, дистанционное зондирование, космическая радиолокация, оптические снимки, нефтегазоносность

DOI: 10.31857/S0205961422020063

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время акватории морей и океанов подвергаются интенсивным негативным антропогенным (Бондур, 2010; Бондур и др., 2012) и естественным (Бондур, Кузнецова, 2015; Kvenvolden, Cooper, 2003) воздействиям, в том числе загрязнением нефтью. Для решения проблем поиска и разведки месторождений нефти необходимо выявлять естественные нефтепроявления (ЕН). ЕН представляют собой пленочные образования на морской поверхности, возникающие в результате высачиваний углеводородов (УВ) на морское дно и последующего поступления их на поверхность (Бондур, 2010; Бондур, Кузнецова, 2012). Выходы природных УВ важны для учета в глобальном балансе углеродного цикла, контроля загрязнений морской среды и состояния морских экосистем (Бондур, 2010, 2012; Бондур, Кузнецова, 2012, 2015). Основываясь на мировых оценках (Kvenvolden, Cooper, 2003), около 47% или более сырой нефти поступает в морскую среду только из-за природных просачиваний нефти.

Высачивания нефти происходят за счет миграции нефтеуглеводородов (НУ) из областей повышенного пластового давления (ПД) в области пониженного ПД по проницаемым породам или

тектоническим нарушениям (Гаврилов, 2012). Такие высачивания наблюдаются в районах распространения различных подводных источников (эруптивных структур морского дна), через которые нефть поступает на морское дно. Подводные источники НУ распространены в Мировом океане от побережий до глубоководных районов в самых разных геологических зонах. Скрытые водами морей и океанов, их количество исчисляется тысячами, и они многообразны по своему происхождению и структуре (Kvenvolden, Cooper, 2003; Холодов, 2012; Шнюков и др., 2017). Их также называют сипами – областями разгрузки жидких и газообразных углеводородов, к которым относятся грязевые вулканы, грифоны, сальзы и т.п. флюидовыводящие или эруптивные структуры на дне моря в местах сосуществования нефтегазовых залежей и сетей разломов (Link, 1952; Etiope, 2015). Так, согласно (Лимонов, 2004; Бондур, Кузнецова, 2015), подводные источники исследуются с точки зрения нефтегазоносности, а также как природное явление, в том числе, опасное, которое должно учитываться при проектировании морских сооружений нефтегазового комплекса.

К основным процессам, влияющим на активность подводных источников, и соответственно на высачивания нефти, относят сейсмические и

тектонические процессы (землетрясения, процессы сжатия и т.д.) (Бондур, 2010; Бондур, Кузнецова, 2012, 2015). Данную взаимосвязь продемонстрировали ряд исследований, например, в (Geersen et al., 2016) установлено, что сильное землетрясение Мауле в 2010 г. вызвало выходы газа у побережья Чили. В свою очередь утверждается, что просачивания могут возникать как во время, так и после землетрясений, а также перед ними, выступая при этом предвестниками землетрясений (Vasilev et al., 2021).

Важным наблюдением также является взаимосвязь просачиваний нефти и расположения нефтегазоносных регионов (Бондур, Кузнецова, 2012; Иванов и др., 2020). В связи с этим ЕН рассматривают в качестве индикаторов перспективной нефтегазоносности (Аэрокосмический..., 2012).

Исследование ЕН, их подводных источников, сейсмической и тектонической обстановки, а также нефтегазоносности региона возможно благодаря поступившим на морскую поверхность в результате просачиваний пятнам нефти (или ЕН), видимых визуально и инструментально (Иванов и др., 2020). Регистрация ЕН может проводиться с использованием космических (Бондур, 2010; Иванов, 2007; Аэрокосмический..., 2012; Bondur, 2005, 2011) и подспутниковых методов (Бондур и др., 2007; Keeler et al., 2004), а также путем их комплексирования (Bondur, 2005; Bondur, Tsidilina, 2005; Bondur, Zamshin, 2018). Кроме этого, могут использоваться методы математического моделирования (Бондур и др., 2006; Bondur, 2011). Методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют регистрировать такие пятна нефти, плавающие на поверхности моря, и определять их характеристики (Бондур, 2010; Аэрокосмический..., 2012).

Хорошо известно, что пленки нефти подавляют мелкие гравитационно-капиллярные волны, создают области выглаживания (слики) на поверхности моря, изменяя пространственные спектры поверхностного волнения (Bondur, 2005, 2011), вызывают различия спектральных яркостей в местах нефтепроявлений по сравнению с фоном (Бондур, Зубков, 2005; Pugach et al., 2018), уменьшают обратное рассеяние в сторону антенны космического аппарата и соответственно формируют темные пятна на радиолокационных изображениях (РЛИ) морской поверхности (Иванов, 2007; Бондур, 2010). Благодаря этому в настоящее время исследование ЕН возможно с использованием подходов и методов дистанционного зондирования. Данные ДЗЗ обладают рядом преимуществ, которые позволяют решать задачу изучения ЕН, среди них: большая обзорность, возможность проведения исследований в удаленных районах, получение информации с различным пространственным и временным разрешением, глобаль-

ное покрытие, регулярность, оперативность получения данных и ряд других преимуществ (Бондур, 2010; Аэрокосмический..., 2012; Bondur 2005, 2011).

Для наблюдения, мониторинга и изучения нефтепроявлений в настоящее время используют данные радиолокационных (РЛ) спутников Sentinel-1 (Sentinel-1A – на орбите; Sentinel-1C и Sentinel-1D планируются) и оптических спутников Sentinel-2A, Sentinel-2B, Landsat-8, которые находятся в свободном доступе, а также при необходимости данные коммерческих РЛ-спутников высокого разрешения Radarsat, TerraSAR-X, PAZ, ICEYE и др. Современная спутниковая система мониторинга, помимо оперативности, доступности и всепогодности, независима от других методов наблюдений (Бондур, 2010; Аэрокосмический..., 2012). При проведении мониторинга ЕН важно исследовать фоновые характеристики водной среды, в том числе поля скоростей течений (Бондур и др., 2012), приливные явления (Бондур и др., 2007, 2008), характеристики волновых процессов (Бондур и др., 2009) и др.

В настоящей работе подробно рассматриваются основные значимые параметры ЕН, которые можно извлечь из данных ДЗЗ (оптических и радиолокационных), обсуждаются методы и подходы для наблюдения и исследования ЕН, а также анализируется связь ЕН с эруптивными формами морского дна, сейсмичностью, тектоникой, грязевым вулканизмом и нефтегазоносностью. Работа носит обзорный характер, но при этом содержит оригинальные результаты анализа данных ДЗЗ. Обсуждаются также возможности, ограничения и перспективы применения ДЗЗ для рассматриваемых задач.

ОСОБЕННОСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ

Нефть, попадающая на морскую поверхность в результате естественного высачивания или выхода жидких НУ из источников на дне моря, прежде чем достигнуть поверхности, участвует в ряде процессов, среди которых: 1) накопление НУ в пласте-коллекторе или ловушке в геологических временных масштабах; 2) миграция НУ внутри пласта и через перекрывающий слой на морское дно; 3) вертикальный перенос НУ через водную толщу на морскую поверхность (Aminzadeh et al., 2013; Leifer, 2019).

На процессы накопления, миграции и просачивания НУ на морское дно воздействуют многочисленные глубинные геологические факторы: тип отложений, состав флюидов, характер разломов, солевые структуры, стратиграфия, ПД и температура. Вертикальный перенос НУ к поверхности моря определяется влиянием следующих до-

полнительных факторов: состав НУ, глубина моря в месте просачиваний, процессы в водной толще, течения и волнение на поверхности. Соответственно, некоторые жидкие НУ могут остаться на морском дне, другие — достигнуть морской поверхности (Aminzadeh et al., 2013).

Достигнув поверхности моря, жидкий компонент — нефть образует пятна-слики — нефтепроявления различной формы и размеров, которые видоизменяют (выглаживают) ветровое мелкомасштабное волнение и видоизменяются сами под действием различных физико-химических процессов (растекание, дрейф, дисперсия, испарение, эмульгирование, растворение, окисление), истончаются и постепенно исчезают (ИТОРФ, 2015; Патин, 2017).

К значимым параметрам ЕН, на основе которых их можно отличить от пятен прочих нефтезагрязнений относят форму и размеры, направление дрейфа, время жизни, частоту появления, толщину пленки, приуроченность к районам распространения эруптивных структур, сейсмически-активным и нефтегазоносным регионам (Иванов и др., 2007; Гасанов и др., 2005; Алиев, 2006; Бондур, 2012). Например, известно, что нефтепроявления, многократно наблюдаемые в одном месте, являются надежным признаком постоянной подпитки из источников на дне и считаются их поверхностным проявлением (Иванов, 2007; Бондур, Замшин, 2012; Затягалова, 2012). В свою очередь, периодичность появления ЕН отражает чередование импульсов интенсивной работы источников на дне с периодами спокойной разгрузки флюидов (Бондур, Кузнецова, 2012).

Таким образом, изучение ЕН и определение их параметров может дать полезную информацию как о них самих, так и об их источниках на дне, а также путях миграции УВ (Бондур, 2010, 2012; Иванов и др., 2007, 2015; Aminzadeh et al., 2013).

ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ ЕСТЕСТВЕННЫХ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДЗЗ

Изучению ЕН с помощью данных ДЗЗ посвящена обширная литература, в том числе российских авторов (см.: Бондур, 2012; Бондур, Кузнецова, 2012; Евтушенко, Иванов, 2012; Иванов, 2019; Иванов и др., 2007, 2015, 2020; Лаврова и др., 2011; Митягина, 2018; Сизов и др., 2020; Ivanov, Gerivani, 2020; Ivanov, Mogočić, 2020; Ivanov et al., 2020; Клименко и др., 2022). В настоящее время применяют различные подходы и методы для изучения ЕН, отображающихся на космических изображениях.

Среди дистанционных методов изучения ЕН часто используются радиолокационные и оптические методы. На РЛИ пленки ЕН формируют

области пониженного рассеяния (темные области на фоне морской поверхности) в результате выглаживания мелкомасштабного поверхностного волнения. Данные области служат предварительными индикаторами нефтепроявления. При слабом ветре (1–2 м/с) наблюдаются неблагоприятные условия для обнаружения и идентификации нефтяных пятен из-за низких значений удельной эффективной площади рассеяния поверхности моря. В таких случаях отмечается высокая вероятность появления ложных тревог — сликов биогенного и аэрогидродинамического происхождения из-за значительной изменчивости ветра у поверхности моря. При сильном ветре (>7 м/с) на морской поверхности остаются только пятна тяжелой нефти или нефтепродуктов, но при дальнейшем увеличении скорости ветра, как правило, слики исчезают с поверхности моря (Иванов, 2007).

Таким образом, для РЛ-обнаружения и распознавания нефтяных сликов естественного происхождения среди сликов иной природы важно учитывать гидрометеорологические условия (ГМУ), в частности скорость ветра (оптимальным признан диапазон скоростей ветра 3–7 м/с), которая выступает своеобразным фильтром (Иванов, 2007).

Для определения параметров ЕН, таких как толщина пленки и объем выбросов используют пассивные методы ДЗЗ, к которым относят оптические методы. Дистанционное зондирование в видимом диапазоне основано на наблюдении яркости рассеянного и отраженного океаном солнечного света. Падающее солнечное излучение частично отражается водной поверхностью, верхним слоем моря, взвешенными в нем частицами и морским дном. Отражательные свойства морской поверхности определяются рядом оптических характеристик, включая спектральный и интегральный коэффициенты яркости, спектральное и интегральное альbedo и контраст. В свою очередь, нефтепроявления (пленки нефти) влияют на составляющую яркости, обусловленную отражением от морской поверхности, так как отражательная способность нефти выше, чем окружающей морской воды. Оптические свойства нефтяной пленки на поверхности моря изменяются в зависимости от ее толщины (Бондур, 2010, 2012; Лаврова и др., 2011; Fingas, 2018).

Нефтяные пятна естественного происхождения часто имеют так называемую точку всплытия или кляксообразные утолщения, где всплывшая нефть некоторое время аккумулируется на поверхности моря. Как тонкие пленки, они достаточно хорошо отслеживают поле преобладающих течений. Только в редких случаях на дне имеются одиночные источники. Часто источники располагаются группами, а более крупные из них

осложнены второстепенными – грифонами и сальзами, – в результате чего на морской поверхности образуются хорошо выраженные кластеры подобных по форме пятен. Форма и размеры пятен достаточно характерны: это длинные (иногда десятки километров) линейчатые образования, нередко имеющие форму запятых, меандров, зигзагов или даже петель (рис. 1); только что всплывшая нефть имеет форму округлых пятен небольшой площади. Время существования на морской поверхности обычно составляет от нескольких часов до суток и более, что зависит от ГМУ (Daneshgar Asl et al., 2017). В связи с естественным происхождением эти пятна привязаны к известным районам нефтегазонакопления или сосредоточения на дне грязевых вулканов, грифонов, сипов, которые источают НУ (Иванов и др., 2007; Бондур, Кузнецова, 2012).

С целью повышения вероятности обнаружения ЕН используют геоинформационный (ГИС) подход (Иванов, Затягало, 2007). ГИС-подход основан на интеграции в ГИС среде всей доступной информации, в частности данных ДЗЗ, физико-географической информации о водном бассейне, структуре морского нефтегазового комплекса, данных автоматических систем идентификации судов – АИС и др. Тематические ГИС способствуют повышению качества идентификации пятен нефтепроявлений, определения характеристик их пространственного распределения и выявления мест их концентрации. Кроме того, ГИС-подход позволяет извлечь информацию о местоположении (выявляется практически автоматически по мере накопления данных), о линейных размерах и площадях нефтяных пятен, т.е. определить основные характеристики нефтепроявлений, а иногда и оценить их активность по частоте появления пятен на поверхности моря (Иванов и др., 2007).

Благодаря появлению численных методов стало возможным моделирование распространения нефтяных пятен. Преимущество совместного использования данных ДЗЗ, гидрометеорологической и океанологической информации и результатов численного моделирования состоит в том, что все это позволяет проследить трансформацию пятна, обнаруженного, например, на РЛИ, во времени и пространстве, а также определить его дрейф до момента исчезновения (Овсиенко и др., 2005; Становой и др., 2007; Liungman, Mattson, 2011).

Поэтому, если известны характеристики нефти, параметры разлива и условия окружающей среды (ветер, течения, волнение, температура поверхности моря и др.), то моделирование основных гидродинамических процессов и дрейфа не представляет затруднений (Klemas, 2010; Daneshgar Asl et al., 2017). С другой стороны, процессы биохимического выветривания нефти известны с неко-

торой степенью достоверности и могут быть лишь описаны эмпирическими моделями, которые часто основаны на лабораторных результатах или небольшом количестве тестирований в море, что создает погрешности.

ПАРАМЕТРЫ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ, ОЦЕНКИ КОТОРЫХ МОЖНО ПОЛУЧИТЬ С ПОМОЩЬЮ ДЗЗ

Форма и размеры

Пленки ЕН на морской поверхности в целом имеют линейчатую форму, но нередко проявляются в виде точечных (круглых), серповидных, подковообразных, петлеобразных и спиралевидных структур относительно небольших размеров (Иванов и др., 2007). Их видимая форма обусловлена динамикой верхнего слоя моря. Это, в первую очередь, переменчивые течения у поверхности, которые часто меняют свое направление в зависимости от преобладающего ветра. В зависимости от ГМУ и времени нахождения на поверхности нефтепроявления имеют различные формы и размеры. Например, только что всплывшая нефть имеет форму округлых пятен небольшой площади. Со временем она подвергается воздействию ветра и течений и приобретает форму длинных вытянутых сликов. Кольцевая, петлеобразная и спиральная формы пятен (рис. 1) – результат вовлечения пленок в локальные вихревые структуры (Иванов и др., 2007).

Изгибы и меандры пятен часто отражают направление ветра через поле дрейфовых течений: плавные кривые изгибы указывают на постепенное изменение направления ветра/дрейфовых течений, в то время как резкие изгибы фиксируют резкие изменения (MacDonald, 1998; Espedal, Wahl, 1999).

Общая площадь пятен определяется объемами выбросов из подводного источника, периодичностью разгрузки, а также фракционным составом нефти, выходящей на поверхность, и ГМУ. Линейные размеры нефтепроявлений могут достигать нескольких сотен метров в ширину и нескольких десятков километров в длину (Daneshgar Asl et al., 2017). Разнообразие форм и размеров нефтепроявлений в зависимости от ГМУ (ветра и течений), предшествовавших съемке, показано на рис. 1.

Известным районом распространения ЕН является юго-западная (ЮЗ) часть Каспийского моря, она обладает сложным характером циркуляции, который обусловлен наличием циклонических, антициклонических завихрений, мелко-масштабных вихрей и диполей. Около 90% всех выявленных вихрей в Каспийском море обнаружено благодаря “пленочному механизму”

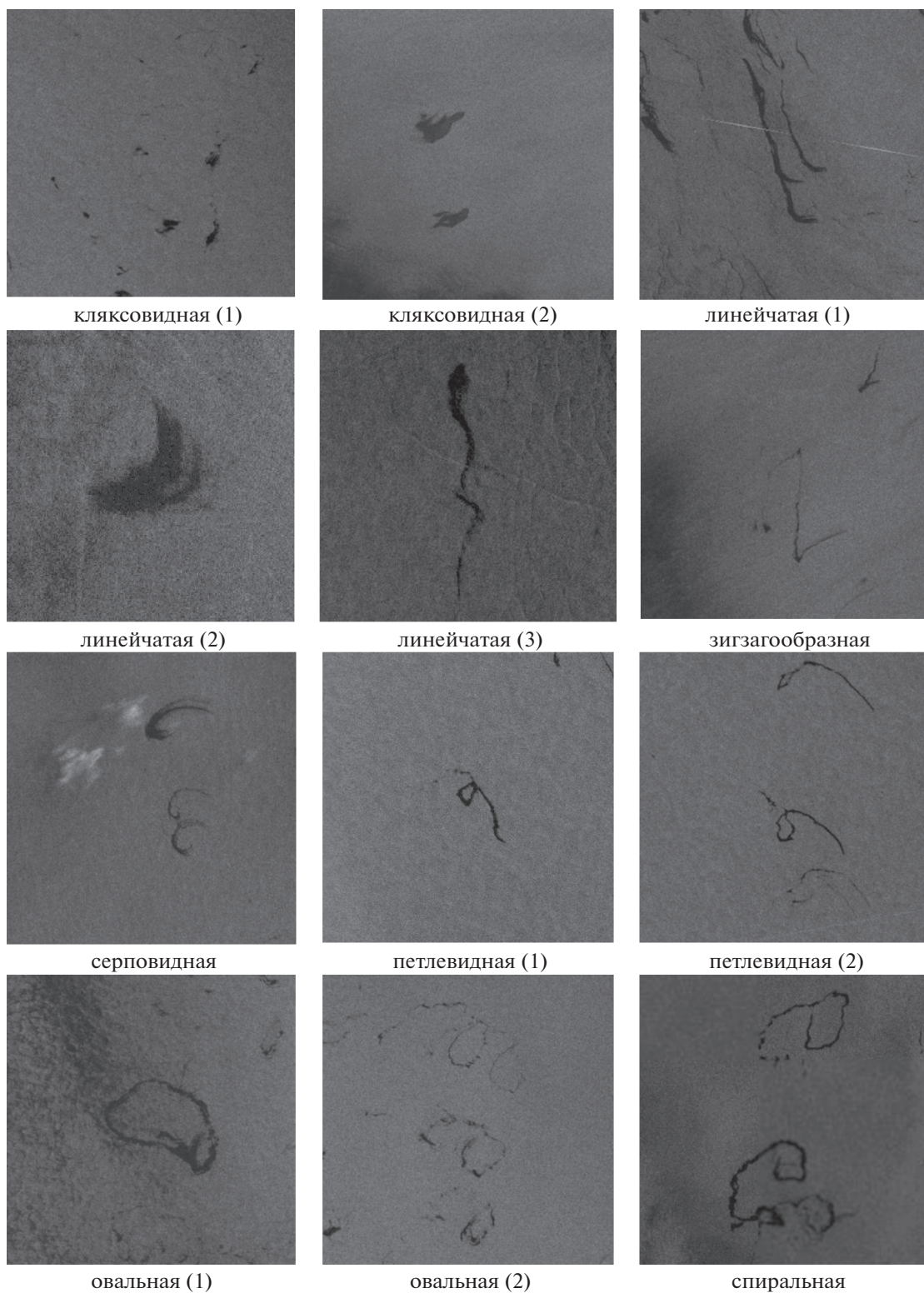


Рис. 1. Разнообразие форм нефтепроявлений в Каспийском море и на северо-восточном шельфе о. Сахалин, отображившихся на РЛИ спутников Sentinel-1A/1B.

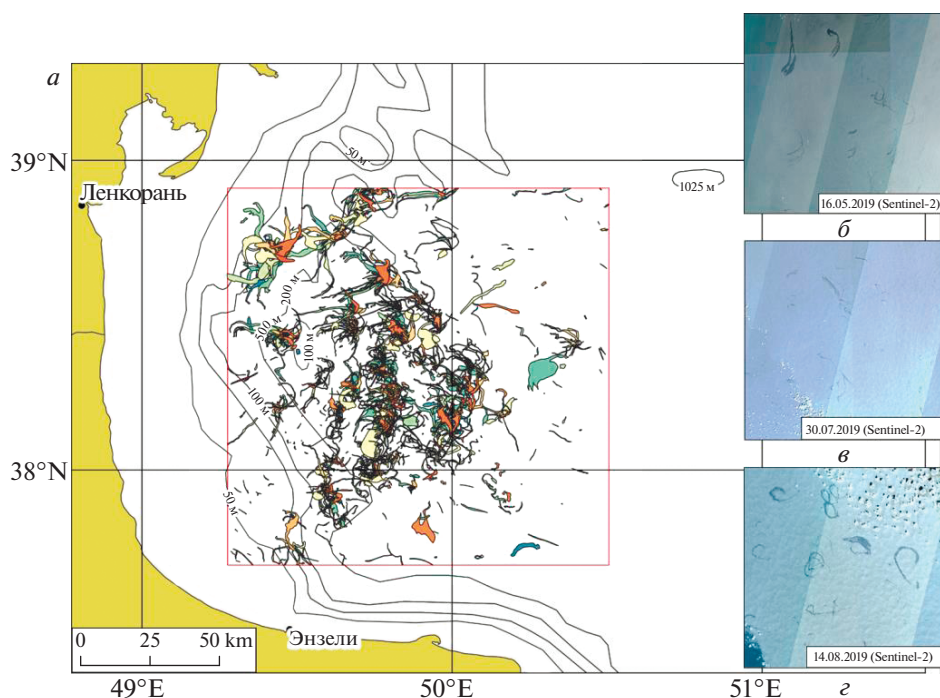


Рис. 2. Пример группировки ЕН в ЮЗ части Каспийского моря и их отображение на оптических изображениях: *а* – контуры обнаруженных нефтепроявлений за 2019 г., интегрированные в ГИС-среде; *б–г* – фрагменты оптических изображений Sentinel-2 от 16.05, 30.07. и 14.08.2019 на район интереса.

(Лебедев и др., 2015). При этом величина и направление поверхностных течений в море могут значительно меняться в зависимости от преобладающего ветра. Например, в ЮЗ Каспии на фоне общего циклонического круговорота, который образуется под действием стока рек (главным образом р. Куры) и ветра, достаточно часто в открытой части моря формируются мелкомасштабные вихри. В работе (Иванов и др., 2007) отмечается, что пятна этой части моря вовлекаются в локальные циклонические круговороты.

Необходимо обратить внимание, что нефтепроявления в ЮЗ части Каспийского моря чаще

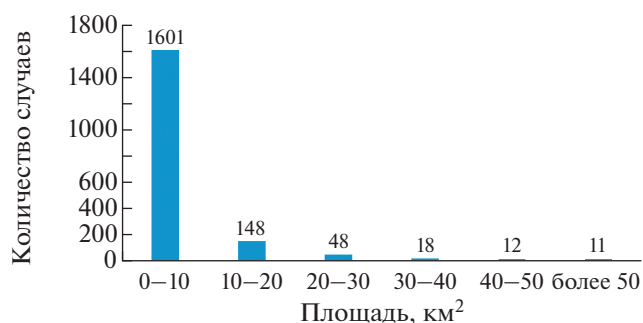


Рис. 3. Количество случаев регистрации ЕН различной площади по данным спутников Sentinel-1 и Sentinel-2 в 2019 г. в пределах ЮЗ части Каспийского моря.

принимают серповидную, петлеобразную и спиралевидную формы (рис. 2). Такие конфигурации пятен объясняются дрейфом нефти от места выхода на поверхность под действием фоновых течений с инерционными колебаниями, характерными для Каспийского моря. В основном циклоническая форма спиралей и петель обусловлена наличием изменчивого поля течений в южной части Каспийского моря (Лебедев и др., 2015).

На рис. 2 представлен пример группировки ЕН различной формы в ЮЗ части Каспийского моря, полученный путем визуального дешифрирования РЛИ и оптических снимков Sentinel-1 и Sentinel-2 в период с 1.01 по 31.12.2019 и их последующего ГИС-анализа. Анализ размеров нефтепроявлений в ЮЗ части Каспийского моря показал, что площадь отдельного пятна в основном варьирует в диапазоне от 0.02 до 10 км².

В итоге, признаками значительной энергетической разгрузки подводных источников в данном регионе можно считать площадь образовавшихся пятен более 10 км², а также их форму. Так, в 2019 г. здесь зарегистрировано 237 нефтепроявлений самой разнообразной формы суммарной площадью более 10 км² (рис. 3).

Таблица 1. Смещение положения пятна нефти (в метрах) на морской поверхности относительно источника на дне в зависимости от постоянной по глубине скорости течения V (при скорости всплытия пузырьков 20 см/с) (Иванов и др., 2007)

Глубина, м	$V = 10$ см/с	$V = 20$ см/с	$V = 30$ см/с
100	57	100	173
250	142.5	250	432.5
500	285	500	865

Растекание и дрейф на поверхности моря

Как только нефть из подводных источников попадает на поверхность моря, она начинает подвергаться различным процессам, в частности процессам растекания и дрейфа, смещаясь от точки всплытия. Растекание нефти по поверхности моря происходит вначале под действием сил гравитации, а затем контролируется ее вязкостью и силами поверхностного натяжения (Бескид, Дурягина, 2011; Патин, 2017). Дальнейшая судьба и дрейф нефтяного пятна определяются совместным действием метеорологических и гидрологических факторов. На скорости распространения и последующего фрагментирования пятна влияют поверхностные течения, ветер, волнение моря, турбулентность, приливно-отливные течения — чем интенсивнее совокупность сил, тем быстрее происходят данные процессы (ИТОРФ, 2015). В литературе описан ряд случаев распространения пятен ЕН на несколько километров всего за несколько часов и на несколько десятков километров за несколько дней (Daneshgar Asl et al., 2017).

При известных параметрах скорости и направления ветра и течений, а также времени нахождения пленки на поверхности моря возможно оценить смещение пятна от места всплытия. По оценкам (MacDonald et al., 1993), скорость перемещения нефтяных пятен составляет 60% скорости течения и 2–4% скорости ветра. От места всплытия нефть перемещается по поверхности воды в направлении равнодействующей силы ветра и течения, которая определяется соотношением (Бескид, Дурягина, 2011):

$$U = 0.6U_c + 0.03U_w, \quad (1)$$

где U_c — скорость течения; U_w — скорость ветра.

В самом общем случае, среднее время жизни пленок ЕН при благоприятных ГМУ оценивается в 12 ч (Иванов, 2007; Бондур, Кузнецова, 2012). Таким образом, при общих оценках смещение нефтепроявления можно оценить, как произведение найденной скорости дрейфа пятна и среднего времени жизни.

Определение места всплытия

Определение места (точки) всплытия возможно по набору последовательных разновременных

спутниковых снимков. Нефтепроявления на серии этих РЛИ/снимков создают характерную группировку поверхностных проявлений около точки, координаты которой принимают за точку всплытия. Опыт работы с РЛ-данными показывает, что в целом их точность зависит от географической привязки оригинальных снимков и составляет ~10–20 м. Однако это не равносильно точности привязки пятна-слика к его подводному источнику, поскольку пятно на поверхности может быть смещено относительно источника на сотни (Иванов и др., 2007), а иногда и тысячи метров (Najoui et al., 2018).

Точность привязки пятна к его подводному источнику зависит от ряда факторов. Во-первых, это факторы среды, и, прежде всего, подповерхностные и поверхностные течения, которые сначала отклоняют восходящую струю пузырьков в оболочке нефти от вертикали, а затем переносят пятно по поверхности моря. Скорость подъема пузырьков газа в оболочке нефти по оценкам составляет 20–25 см/с, причем она уменьшается с увеличением глубины (Иванов и др., 2007; Najoui et al., 2018). Кроме того, в общем восходящем потоке наблюдаются и отдельные капли нефти, скорость всплытия которых несколько меньше. Она зависит от их размера: чем больше капля, тем больше скорость восходящего потока. Время, которое требуется капле нефти, чтобы достичь поверхности, зависит от ее диаметра и глубины моря. Например, для глубин от 1000 до 3000 м среднее время составляет 20 ч, 3 ч и 31 мин для капель нефти диаметром 0.5, 5 и 100 мм соответственно (Najoui et al., 2018). В работе (Иванов и др., 2007) даны оценки смещения нефтепроявления на морской поверхности относительно источника на дне в зависимости от постоянной по глубине скорости течения V (при скорости всплытия пузырьков 20 см/с) (табл. 1). Из табл. 1 видно, что совокупность снимков точнее отмечает положение источника на дне в мелководных районах моря (глубины 50–250 м), чем в глубоководных.

Рассмотрим результаты анализа в ГИС серии разновременных оптических снимков Sentinel-2A/2B и Landsat-8 акватории Среднего Каспия на рис. 4. В 2019 г. на спутниковых снимках в пределах данного участка наблюдались нефтепроявления, площади которых достигали десятков км², имеющих одно и то же место всплытия

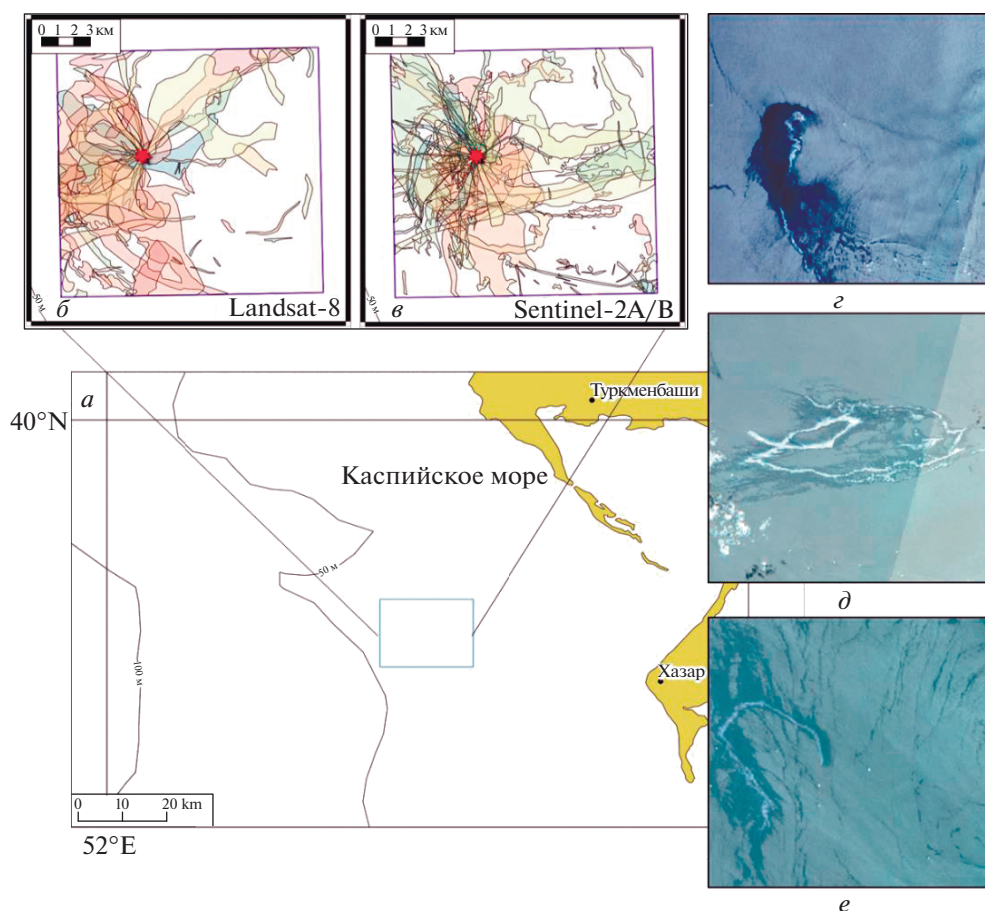


Рис. 4. Карты-схемы нефтепроявлений в туркменском секторе Каспийского моря, построенные по данным спутниковых наблюдений, с обозначением точки всплытия: *a* – фрагмент обзорной карты с положением района интереса; *б–в* – контурное отображение нефтепроявлений на снимках спутников Landsat-8 и Sentinel-2A/2B; *з–е* – примеры отображения нефтепроявления на оптических снимках Sentinel-2A/2B, полученных: 18.05, 12.07 и 21.08.2019 соответственно.

($52^{\circ}36.2'$ в.д., $39^{\circ}32.9'$ с.ш.; глубина ~ 50 м), координаты которого совпали с ранее обнаруженным источником (Crude Accountability, 2013; Митягина, Лаврова, 2020). Если в этой части моря скорости течений у поверхности составляют $10\text{--}20$ см/с (Лебедев и др., 2015) и они постоянны по глубине, смещение точки всплытия от реального положения подводного источника на дне можно считать минимальным (~ 57 м) и использовать координаты этого места в качестве координат источника на дне.

Кроме того, хорошо известно, что нефть в море деградирует в результате “выветривания”. По мере удаления пленки нефти от места ее проявления эти эффекты будут приводить к прогрессирующему истончению пленки в результате растекания, пока пятно не перестанет быть различимым. Поэтому пятно, образовавшееся в результате единичного выброса нефти, имеет определенное “время жизни” (MacDonald et al., 1993).

Время жизни на морской поверхности

Под временем жизни нефтяного пятна на морской поверхности подразумевается промежуток времени между моментом появления нефти и моментом ее исчезновения с поверхности моря в результате взаимодействия с внешней средой. Для продолжительных или продолжающихся выбросов нефти в море всегда наступает момент, когда поступление нефти на поверхность в районе источника уравнивается ее исчезновением за счет испарения, растворения, диспергирования и других процессов выветривания нефти. Указанный баланс между притоком нефти со дна и ее оттоком наступает через разное время в зависимости от интенсивности истечения нефти, ее свойств и ГМУ (Daneshgar Asl et al., 2017). Как уже говорилось, ЕН могут существовать при скоростях ветра не более $7\text{--}8$ м/с, далее они разрушаются и исчезают с поверхности моря. Daneshgar Asl et al. (2017) отмечают, что при сохранении на-

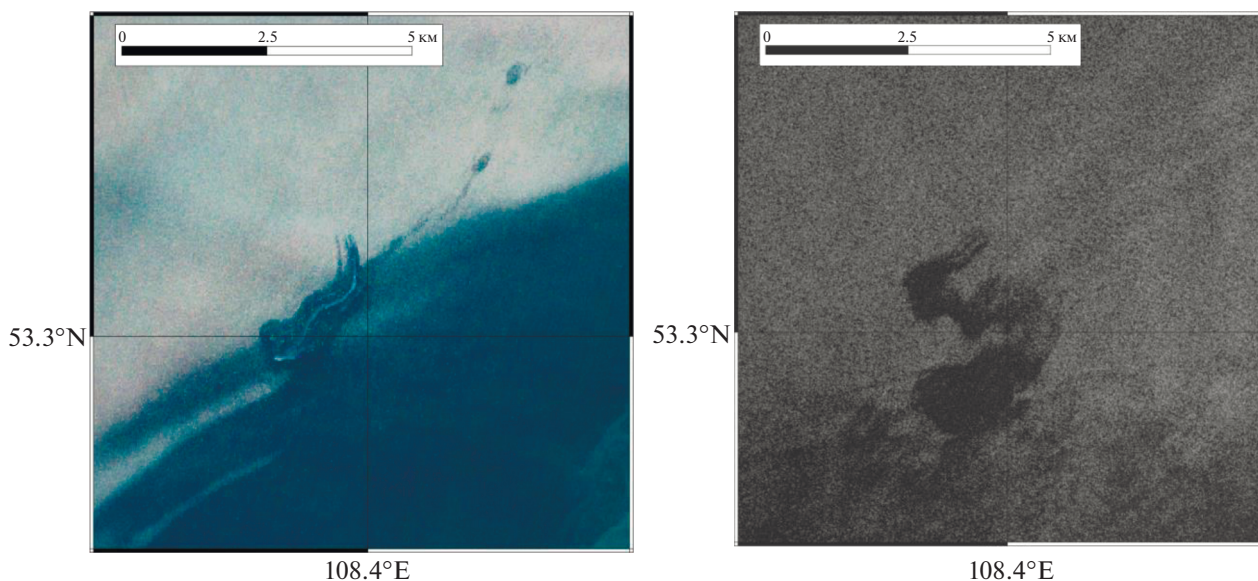


Рис. 5. Нефтепроявление в оз. Байкал, обнаруженное двумя космическими системами: слева – оптический снимок спутника Sentinel-2 от 21.06.2020, 03:55 UTC; справа – радиолокационное изображение Sentinel-1 от 21.06.2020, 22:57 UTC. © ESA.

правления и скорости небольшого преобладающего ветра и течений нефтепроявление может распространиться на десятки км (до 45 км) от места всплытия. При такой длине нефтяного slicka, которую можно измерить на космических снимках, и при средней условной скорости течения 25 см/с, продолжительность жизни ЕН может составлять около 50 ч.

Время жизни нефтяного пятна (и его площадь) значительно влияет на оценки объемов естественного загрязнения (Иванов, 2007; Бондур, Кузнецова, 2012; MacDonald, 1998; MacDonald et al., 2015). Ранее, из общих соображений время жизни пятна ЕН оценивалось в 8–24 ч (Oil in the Sea, 2003; Иванов и др., 2007; MacDonald et al., 2015), что указывало на то, что его активный источник выбрасывает 100 л и более нефти в день. (Здесь заметим, что специальные измерения времени жизни ЕН на поверхности моря неизвестны, различные авторы используют разные методы и оценки для этой задачи).

С другой стороны, для оценки времени жизни ЕН можно использовать данные ДЗЗ, полученные квазисинхронно, на которых отобразилось одно и то же нефтепроявление, – это позволяет более реально определить время его жизни. На рис. 5 показан пример такого наблюдения на снимке Sentinel-2 и РЛИ Sentinel-1 на район ЕН близ м. Горевой Утес в оз. Байкал (см. Иванов (2010)). В итоге время жизни данного нефтепроявления можно оценить в 19 ч, причем за это время площадь нефтепроявления увеличилась почти в 3 раза (с 1.9 до 5.6 км²).

Дополнительно сообщается, что время жизни коротких slickов составляет около 6 ч, длинных (>10 км) – 12–14 ч (Daneshgar Asl et al., 2017); в некоторых случаях – 6–8 ч (Ivanov et al., 2020; Ivanov, Gerivani, 2020). В итоге в каждом конкретном случае необходимо привлекать квазисинхронные данные ДЗЗ или использовать другую априорную информацию, а умозрительный диапазон сузить до 6–12 ч.

Частота выбросов и периодичность работы подводных источников

Частота выбросов и периодичность работы подводных источников характеризуется количеством обнаруженных на морской поверхности нефтепроявлений за определенный промежуток времени. Иногда эту информацию можно также извлечь из данных ДЗЗ.

Судя по частоте появления пятен нефти в разные сеансы космической съемки, действие соответствующих подводных источников может быть разнообразным и, скажем, двояким (Иванов и др., 2007). Во-первых, локальная картина повторяющихся пятен нефти может быть сформирована одним источником, действующим периодически. Во-вторых, эта группа пятен может состоять из проявлений разных близкорасположенных источников в виде сопряженных грифонов, салз или других подводных каналов. В этом отношении показательны источники “многократного действия”, например, находящиеся в пределах локальных южно-каспийских структур Ширван-дениз, Инам, Д-35, Курган-дениз, Ирс и Д-7 (рис. 6),

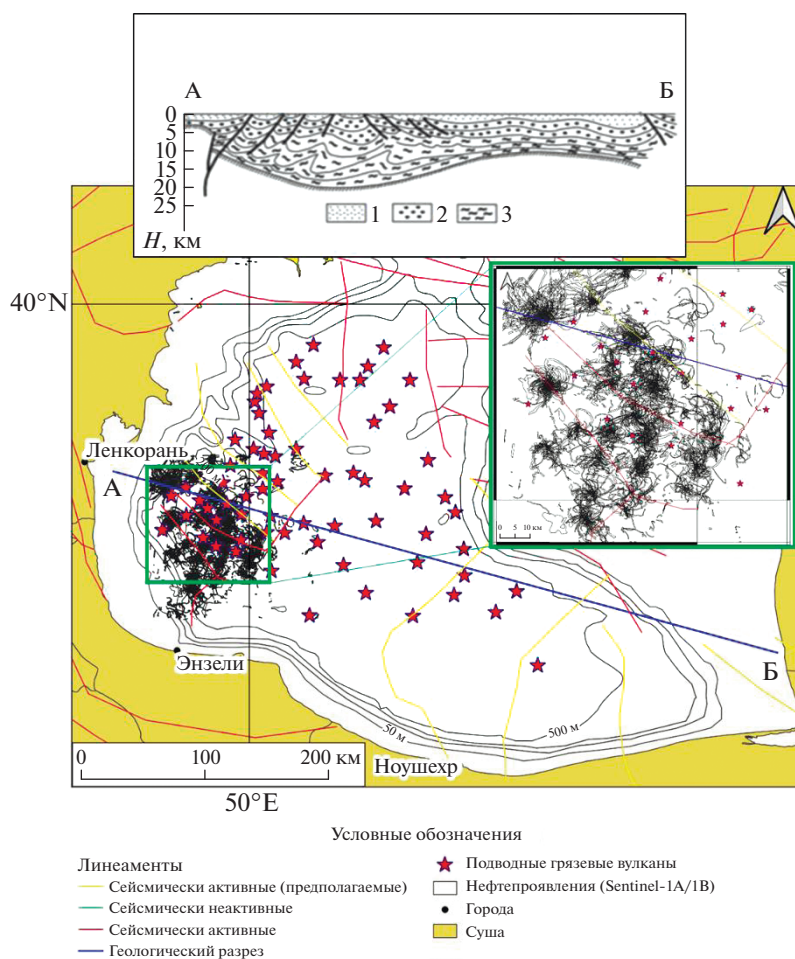


Рис. 6. Карта нефтепроявлений, зарегистрированных по данным спутников Sentinel-1A/1B в районе распространения подводных грязевых вулканов и линеаментов Южно-Каспийской впадины. Вверху: геологический разрез чехла Южно-Каспийской впадины в квазиширотном направлении (Холодов, 2012): 1 – верхний плиоцен и антропоген, 2 – нижний и средний плиоцен, 3 – палеоген и миоцен.

нефтепроявления которых обусловлены грязе-вулканической деятельностью.

Процесс одновременного образования совокупности сликов над одним и тем же источником (рис. 1) достаточно интересен и еще малоизучен. Двойные и тройные сигнатуры могут образоваться по двум причинам. С одной стороны, не исключено, что источник, работая периодически, может в течение некоторого промежутка времени выбросить 2–3 порции газа и нефти. В этом случае на поверхности должно образоваться несколько пятен, удаленных друг от друга на некоторые расстояния из-за сноса течением по мере подъема на поверхность и течениями у поверхности. С другой стороны, эти сигнатуры могут быть обусловлены одновременной работой основного источника и двух-трех второстепенных на его периферии. В этом случае также может образоваться несколько пространственно разнесенных пятен. Поэтому обнаружение локальных групп (от 2

до 4) пятен на небольшом участке поверхности моря может означать более или менее постоянную и периодически действующую группу подводных источников. Таким образом, в настоящее время нет однозначного ответа на этот вопрос, однако по мере накопления экспериментальных данных напрашивается вывод о сопряженных источниках на дне моря, которые работают постоянно, периодически или эпизодически.

Толщина пленок

На поверхности моря пятна ЕН образуют достаточно устойчивый слой тонкой нефтяной пленки (Патин, 2017; MacDonald, 1998). Разница между отражением от тонкого слоя нефти и обычным рассеиванием света морской водой при определенных условиях делает эти пятна весьма заметными для космических аппаратов (MacDonald, 1998).

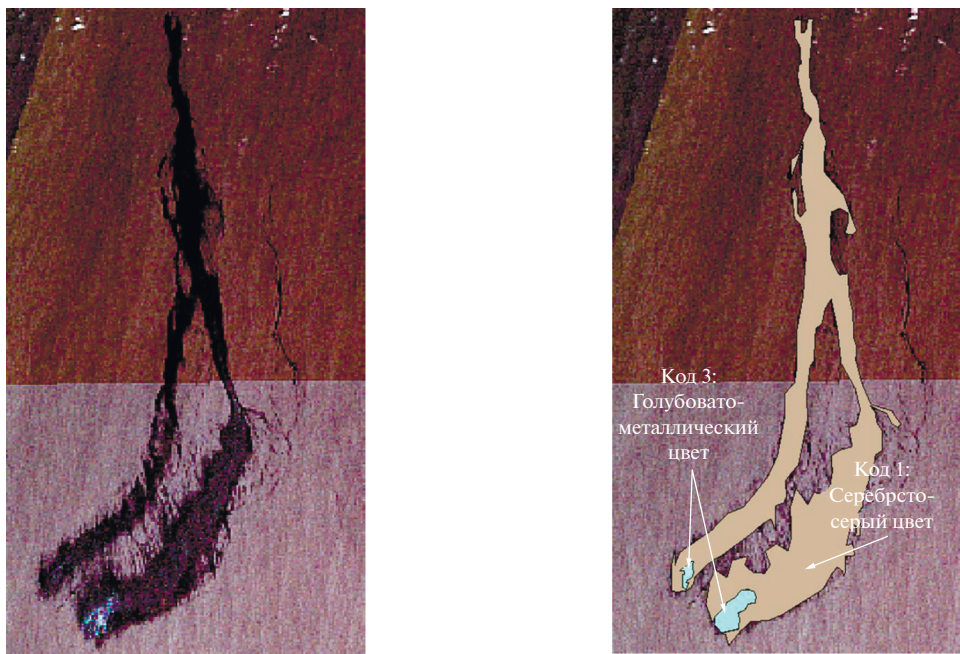


Рис. 7. Пример цветового кодирования ЕН в Каспийском море на оптическом снимке Sentinel-2 (16.05.2019), классифицированного в соответствии с методом кодирования нефтяных пленок ВАОАС.

Известны различные методы оценки толщины естественных пленок нефти, в пределах которых они существуют на морской поверхности. Здесь отметим минимальную и максимальную границы толщины пленки ЕН, обозначенные в литературе, т.е. 0.04 и 50 мкм (или 4×10^{-6} и 5×10^{-3} мм). Для гашения капиллярных волн и создания видимого эффекта, нефтяные пленки должны иметь микронную толщину (Fingas, 2018; MacDonald et al., 1993, 2015). Наибольшую толщину пленки ЕН имеют вблизи точки всплытия. Под воздействием ветра и течений пленка растекается, ее толщина постепенно уменьшается, и таким образом переносится на некоторое расстояние от места разлива. После достижения критической толщины (порядка 0.1 мкм) целостность нефтяной пленки нарушается, и она начинает разбиваться на отдельные фрагменты.

Толщина пленки может дать представление о составе, интенсивности и объеме подводных выбросов. Для определения толщины нефтяной пленки используют цветовое кодирование (оценка толщины пленки нефти, соотношенная с ее визуальным цветом). Начиная с 1960-х гг., предложен ряд различных методик определения толщины пленок, в настоящее время наиболее актуальная — это методика ВАОАС (Bonn Agreement Oil Appearance Code — ВАОАС (2016)) и руководство ASTM (ASTM, 2017). Цвет нефтяной пленки определяется характером взаимодействия световых волн различной длины с поверхностью воды, покрытой нефтяной пленкой. К факторам, влияющим

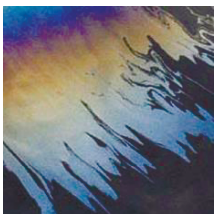
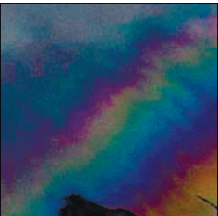
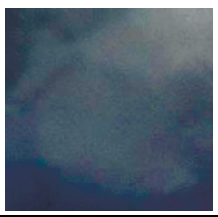
на внешний цветовой вид нефтяной пленки, относят высоту солнца над горизонтом, угол обзора, состояние поверхности моря и тип нефти/нефтепродукта. Наблюдаемый визуально цвет является результатом сочетания этих факторов (Fingas, 2018; ВАОАС, 2016).

Пленки ЕН в большинстве случаев образуются легкими фракциями нефти, реальные цвета которых изменяются от металлически-серого (толщина 5.0–50 мкм) в месте всплытия, радужного (0.3–5.0 мкм) и серебристо-серого (0.04–0.3 мкм) на дальней периферии (Fingas, 2018; ВАОАС, 2016). К настоящему моменту исследователи пришли к выводу о том, что цветовая кодировка достаточно адекватно описывает нефтяные пленки толщиной 1–3 мкм (Fingas, 2018). Значения толщин пленок в зависимости от их цвета представлены в табл. 2.

Согласно табл. 2 наиболее тонкие пленки (0.04–0.3 мкм) при определенном освещении отображаются на морской поверхности в виде серебристо-серых областей. Состав таких пленок представлен самыми легкими фракциями сырой нефти. Они характеризуются испаряемостью в течение нескольких часов и соответственно низкой устойчивостью к факторам внешней среды. Объем нефти в таких пленках оценивают в $0.04–0.3 \text{ м}^3/\text{км}^2$.

Пленки толщиной 0.3–5.0 мкм на поверхности моря имеют вид радужных пятен. Их состав представлен легкими фракциями сырой нефти. Они также характеризуются низкой устойчивостью к

Таблица 2. Отображение нефтяных пленок различной толщины на оптических снимках и их кодировка согласно ВАОАС (2016)

Код	Фото-пример	Цвет пленки/механизм образования	Состав	Устойчивость к ГМУ/испаряемость	Толщина пленки, мкм	Объем. м ³ /км ²
1		Серебристо-серый (отражение света от пленки и свет, выходящий из верхнего слоя моря)	Легкие фракции сырой нефти, (аналог – бензин)	Низкая устойчивость, испарение в течение несколько часов	0.04–0.3	0.04–0.3
2		Радужный (интерференция света, отраженного от пленки и поверхности воды под пленкой)	Легкие фракции сырой нефти, (аналог – бензин, керосин, газойль)	Низкая устойчивость, испарение до 40% за 24 ч	0.3–5.0	0.3–5
3		Металлический (отражение света главным образом от поверхности пленки)	Легкие и средние фракции сырой нефти, (аналог – дизтопливо)	Средняя устойчивость, испарение легких нефте-продуктов до 10% за 24 ч	5.0–50	5–50

ГМУ, а испаряемость составляет до 40% в течение 24 ч. Объем нефти в радужных пленках может варьировать от 0.3 до 5 м³/км².

Более толстые пленки, которые также могут формировать ЕН, на морской поверхности имеют металлически-серый цвет. “Металлический” – это общий цвет, который определяется эффектом зеркального отражения. Данный цветовой признак существенно зависит от условий освещенности и состояния неба (ИТОРФ, 2015). Состав металлических пленок представлен легкими и средними фракциями сырой нефти. Они характеризуются средней устойчивостью при испаряемости до 10% за 24 ч. Объем нефти в пленках такой толщины может составлять от 5 до 50 м³/км².

Таким образом, оценка толщины пленок необходима для последующего получения информации о подводных выбросах. Для реализации данных целей применяют специальные методики – ВАОАС и ASTM, позволяющие по визуальному цвету нефтяной пленки определить ее толщину.

Оценки объемов выбросов

Объемы выбросов, оценку которых можно получить на основе анализа поверхностных проявлений, дает возможность оценить интенсивность работы подводных источников. Оценки объемов

выброшенной нефти напрямую зависят от общей площади пятен и толщины пленки в пятне.

Для определения объемов выброшенной нефти по космическим данным применяется подход, в котором площадь пятен измеряется на снимке, а толщина пленок оценивается из общих физических соображений, связывающих визуальный цвет пленок с их толщинами (см. выше). Заметим, что разделение пленок по цвету возможно с использованием методов автоматической кластеризации оптических снимков.

На основе измерения площади и оценки толщины по методике ВАОАС (2016) проводится оценка возможного минимального и максимального объема выброса путем умножения площади каждой зоны с учетом покрытия на минимальное или максимальное значение толщины пленки в зависимости от ее цвета:

$$V_{\min} = \sum_1^n (S_n d_{n\min}), \quad (2)$$

$$V_{\max} = \sum_1^n (S_n d_{n\max}), \quad (3)$$

где V_{\min} – минимальный объем выброса; V_{\max} – максимальный объем выброса; n – цветовой код согласно ВАОАС (2016); S_n – площадь части пленочного образования, соответствующая данному

цветовому коду; $d_{n \min}$ – нижняя граница диапазона толщины пленки; $d_{n \max}$ – верхняя граница диапазона толщины пленки.

Наконец, для расчета объемов выбросов в $\text{м}^3/\text{день}$ целесообразно использовать следующую формулу (Daneshgar Asl et al., 2017; Ivanov, Gerivani, 2020):

$$V_d = Sd \frac{24}{t_r}, \quad (4)$$

где V_d – объем выброса в день, S – площадь пятна, d – толщина пленки, t_r – время жизни пленки на поверхности моря.

На рис. 7 показан фрагмент снимка Sentinel-2 с нефтепроявлениями, на котором отчетливо видны две точки всплытия, отображающиеся как голубовато-серые пятна (код 3, площадь 0.95 км^2), и шлейф растекающейся нефти радужного и серебристо-серого цвета (коды 1 и 2) суммарной площадью 19.9 км^2 . Минимальные и максимальные оценки объема, рассчитанные по формулам (2) и (3), составили 5.5 и 54 м^3 ; причем за наиболее реальное значение из общих соображений следует принять 5.5 м^3 (согласно NOAA (2016) 90% нефти содержится в 10% площади наблюдаемого пятна). Похожий подход использовался в ряде недавних работ, например, в (Sun et al., 2018; Ivanov, Gerivani, 2020).

Заметим, что первоначально для этих целей использовались исключительно данные космической радиолокации – РЛИ, на которых неоднородные по толщине нефтяные пятна отображаются однородным темным тоном (разделение пленочного вещества пятна на фракции при растекании не отображается), в связи с чем оценки, вероятно, получались завышенными (Иванов и др., 2007; Евтушенко, Иванов, 2012).

В итоге определение объемов выбросов подводных источников с использованием данных ДЗЗ сводится к анализу оптических снимков и оценок согласно визуальному цвету и измеренной площади слика. Следует заметить, что эта методика постоянно совершенствуется, в частности, могут быть получены более точные оценки, если учитываются время существования пленок на поверхности моря и динамика их растекания/дрейфа (Daneshgar Asl et al., 2017). Основное ограничение при определении объемов с помощью космических данных заключается в значительных различиях оценок из-за широкого диапазона значений толщины пленки и сложности определения времени жизни пленки. Современные, используемые в расчетах усредненные оценки объемов для тонкой пленки в 0.1 мкм и более толстой – в 1 мкм дают разницу больше чем в 10 раз.

Связь с эруптивными формами/структурами морского дна

ЕН образуются на морской поверхности благодаря наличию на морском дне соответствующих геологических структур (эруптивных форм), что сопровождается разгрузкой флюидов в тех или иных геолого-геофизических условиях. Эруптивными формами морского дна принято считать грязевые вулканы, сальзы, грифоны, покмарки и т.п. структуры (Шнюков и др., 1986; Бондур, Кузнецова, 2012).

Единой терминологии для определения морфологических форм, ответственных за нефтепроявления, до сих пор нет. Часто все перечисленные структуры называют общим термином сипы (от англ. *seep* – просачивание) – это различные донные формы или даже небольшие области разгрузки жидких и газообразных УВ на морском дне (Leifer, 2019; Иванов и др., 2020).

Согласно Шнюкову и др. (1986), грязевые вулканы являются основными эруптивными аппаратами грязевого вулканизма, характеризующиеся различной формой с постоянными или эпизодическими во времени извержениями, включающими грязевые массы с газом, водой и нередко со следами нефти, чаще всего располагающиеся группами. Грязевые вулканы включают в себя и более мелкие образования, такие как грязевые сопки или сальзы. К вторичным эруптивным формам относят грифоны, которые образуются на вулканах и сопках. Сальзово-грифонная стадия может рассматриваться как с точки зрения окончания извержения, так и подготовки следующего извержения. Данная стадия характеризуется нарушением монолитности грязевулканических образований, расширением и созданием новых путей (каналов и полостей) разгрузки флюидов (Холодов, 2012).

Рассматривая искусственное грифонообразование, следует помнить, что данное явление часто сопровождает морскую разведку и нефтедобычу. Искусственные грифоны образуются в процессе бурения и эксплуатации скважин, сопровождаясь при этом газо-, нефте- и водовыделениями, которые мигрируют по образовавшимся разломам и трещинам на морское дно. Нередко встречаются случаи утечек нефти из заброшенных скважин или при их реконструкции/дооборудовании (Иванов, Матросова, 2019).

С одной стороны, наличие подобных образований на морском дне может указывать на потенциальные залежи нефти и газа, а также являться поисковым признаком при разведке углеводородных месторождений. Однако, с другой стороны, в настоящее время по данным ДЗЗ установить природу того или иного естественного источника нефти на дне не представляется возможным. Для этого, например, можно использовать другой метод ди-

станционного зондирования, в частности гидролокацию бокового обзора (ГБО) судового базирования, позволяющую получать двумерные картины морского дна.

В связи с ограничением ДЗЗ регистрировать природу естественного источника на дне для установления связи нефтепроявлений, зарегистрированных по космическим изображениям, с эруптивными формами и геологическими структурами привлекают априорные данные об акватории исследования (батиметрия, разломы, наличие известных морфологических форм), которые впоследствии сопоставляют в ГИС среде.

На рис. 6 представлен пример анализа обнаруженных ЕН по данным радиолокационных изображений Sentinel-1A/1B (с 01.01.2019 по 31.12.2019) в ГИС среде, где отображены непосредственно группировки выявленных ЕН, подводные грязевые вулканы, линеаменты разной активности, а также геологический разрез с вертикальным отображением слоев накопления осадков и разломов преимущественно в ЮЗ секторе Каспийского моря. Также на рис. 6 показано пространственное совпадение ЕН с тектоническими разломами и грязевыми вулканами, что подтверждается разломами в пределах геологического разреза (А–Б).

Таким образом, связь нефтепроявлений с эруптивными формами морского дна позволяет привязать ЕН непосредственно к источнику и установить факт его активности. Метод определения связи нефтепроявлений с эруптивными формами морского дна состоит в использовании визуального дешифрирования и ГИС-подхода совместно с геолого-геофизической информацией. Проблемой является частое отсутствие априорных данных об эруптивных формах морского дна и другой подобной информации. Однако совместное использование данных ДЗЗ и ГБО может позволить преодолеть данное ограничение и полностью охарактеризовать подводный источник.

Связь с сейсмичностью, тектоникой и грязевым вулканизмом

Нефтепроявления в Мировом океане часто возникают в результате совокупного действия сейсмических и тектонических процессов, а также грязевого вулканизма. В работе (Алиев, 2006) утверждается, что мощные землетрясения провоцируют извержения грязевых вулканов, и подчеркивается, что грязевулканическая деятельность может активизироваться как до возникновения землетрясений, так и после. При этом извержения грязевых вулканов также могут быть обусловлены землетрясениями, эпицентры которых находятся на некотором расстоянии. Данное обстоятельство определяет возможность возник-

новения просачиваний нефти не в день землетрясения, а через несколько дней и даже недель. Такой временной диапазон зависит от магнитуды землетрясения, глубины очага и расстояния между эпицентром землетрясения и вулканом. Таким образом, землетрясения могут играть роль “спускового механизма” в грязевулканическом процессе. В свою очередь, причинная связь уверенно устанавливается тогда, когда землетрясения и грязевой вулкан находятся в пределах одной разломной структуры (Алиев, 2006).

В связи с этим нефтепроявления, обнаруженные на снимках из космоса, могут играть роль предвестников землетрясений или быть отражением наблюдавшейся ранее сейсмически-активной обстановки. Данная взаимосвязь устанавливается при совместном использовании данных ДЗЗ и априорной информации о сейсмической и тектонической характеристике региона в ГИС среде.

В качестве примера взаимосвязи зарегистрированных ЕН, сейсмичности, тектоники и грязевого вулканизма с использованием данных ДЗЗ был проведен анализ в ГИС данных о землетрясениях 2019 г., информации о системе разломов и положении грязевых вулканов (рис. 8), а также сведений о зарегистрированных в 2019 г. нефтепроявлениях в ЮЗ части Каспийского моря. Так, в 2019 г. в Каспийском регионе по данным Единой геофизической службы (ЕГС) РАН произошло 54 землетрясения с магнитудой от 3.3 до 5.8 (ЕГС РАН, 2019) и обнаружено 1839 нефтепроявлений на РЛИ/снимках Sentinel-1A/1B и Sentinel-2A/2B. Отметим, что магнитуда землетрясения (по шкале Рихтера) имеет физический смысл — она связана с его энергией. Чтобы оценить какой силы сотрясения вызывают землетрясения определенной магнитуды в конкретном месте, необходимо знать координаты эпицентра землетрясения, то есть на каком расстоянии от места появления нефтепроявлений оно произошло.

На рис. 9 представлен график соотношения количества ЕН, обнаруженных в спутниковых данных, и магнитуд землетрясений в Южном Каспии и прилегающих к нему районах. На рис. 9 обращает на себя внимание землетрясение, произошедшее 26.04.2019 с магнитудой 4.0 (расстояние от эпицентра землетрясения до района интереса 298 км). В этот день было обнаружено максимальное количество нефтепроявлений — 118. Кроме того, 30.07.2019 и 31.07.2019 на поверхности моря было зарегистрировано 85 и 55 нефтепроявлений соответственно, когда накануне (29.07.2019) произошло землетрясение с магнитудой 3.5 (расстояние от эпицентра землетрясения — 392 км). Однако при минимальной магнитуде 3.3 образовалось одно нефтепроявление, а при максимальной магнитуде 5.8 — два нефтепроявления.

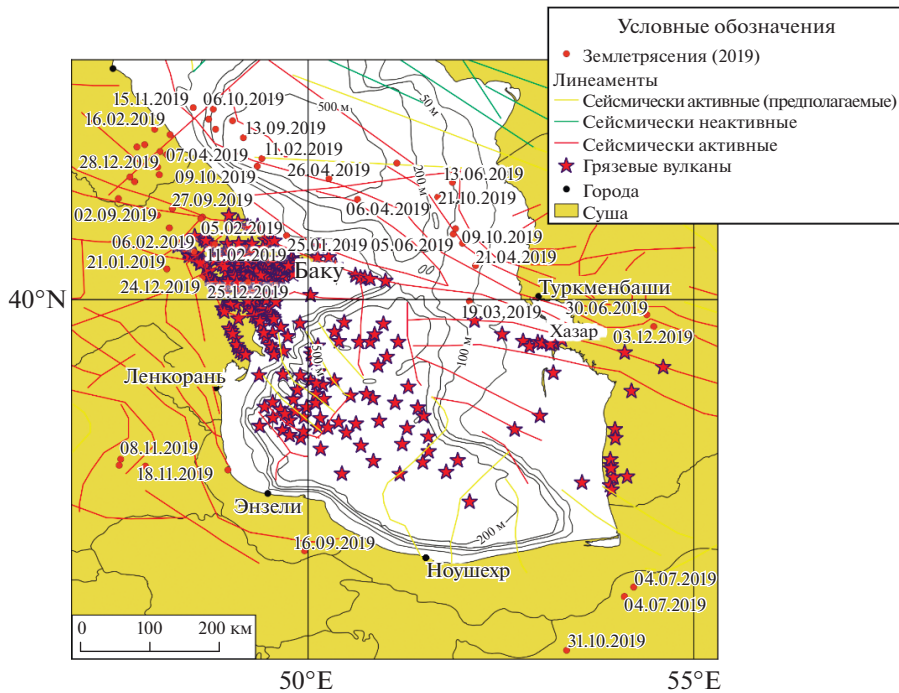


Рис. 8. Карта сейсмичности (точки), тектоники (линии) и грязевого вулканизма (звездочки) Каспийского региона в 2019 г., составленная по данным ЕГС РАН и Алиева (2006).

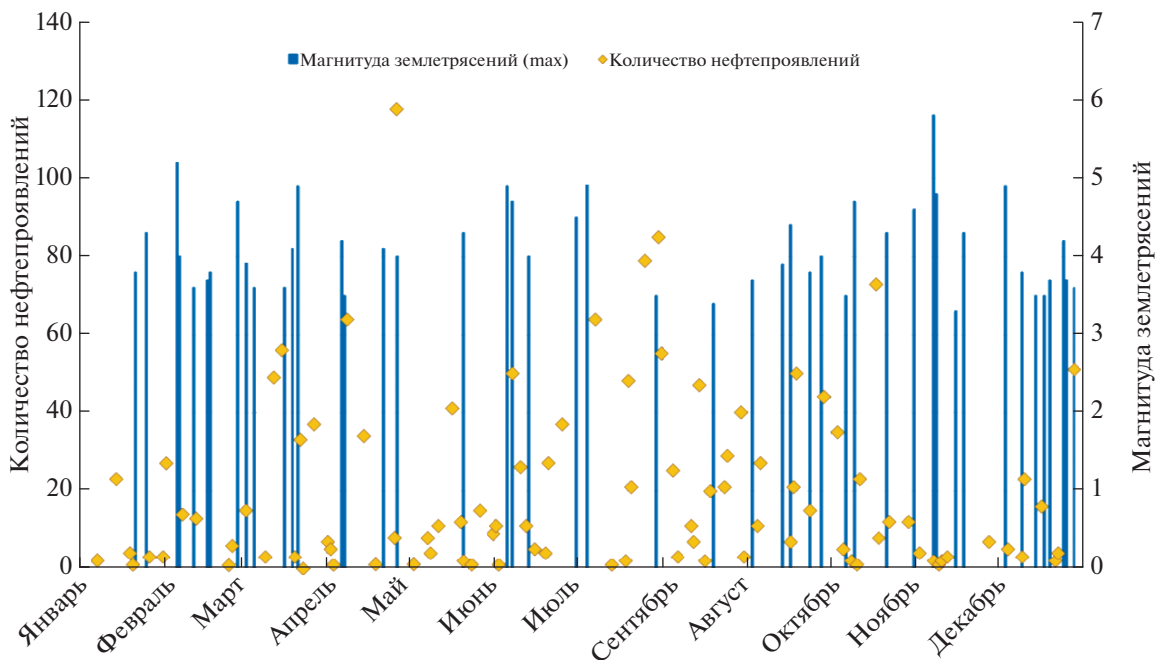


Рис. 9. Количество нефтепроявлений, обнаруженных на космических снимках Sentinel-1A/1B и Sentinel-2A/2B, и магнитуды землетрясений в Каспийском регионе и прилегающих к нему районах в 2019 г.

В итоге, корреляция обнаруженных ЕН с импульсами сейсмичности оказалась неоднозначной. В связи с чем можно только предполагать об

их взаимосвязи. Выявленная неоднозначность объясняется постоянным сейсмоактивным состоянием Каспийского региона, на фоне которо-

го регулярно активизируются подводные источники и регистрируются нефтепроявления.

Связь с нефтегазоносностью

Некоторые районы с регулярными нефтепроявлениями расположены в пределах или вблизи известных нефтегазоносных районов (Aminzadeh et al., 2013). Считается даже, что нефтепроявления на суше и море привели к обнаружению месторождений, как это, например, было в Каспийском море (район Баку) и Пенсильвании (США) (Etiop, 2015). Кроме того, известно, что многие ЕН являются результатом разрушения крупных нефтяных резервуаров, в связи с этим просачивания нефти и газа являются одной из предпосылок для добычи нефти в регионе (Бондур 2010, 2012; Бондур, Кузнецова, 2012; Link, 1952; Etiop, 2015). Однако в большинстве морских районов, где идет добыча НУ, пятна ЕН на поверхности отсутствуют, а в некоторых районах, наоборот, при наличии ЕН на морской поверхности добыча углеводородов не осуществляется или разведка показала отсутствие крупных залежей (Aminzadeh et al., 2013).

Существуют четыре основных геологических условия, которые должны выполняться, прежде чем бассейн станет коммерческим нефтепромыслом. К ним относятся: (1) достаточная толщина осадочных пород, (2) материнские породы в пределах осадочного комплекса, (3) породы-коллекторы, накапливающие нефть, и (4) ловушки для накопления НУ (Link, 1952).

ЕН доказывают, что в осадочных породах бассейна имеется нефть и ее источник. Согласно (Link, 1952; Etiop, 2015), существуют пять основных типов просачиваний естественных нефтей (рис. 10):

1. выходы нефти из пластов моноклиналиного залегания;
2. выходы нефти, вызванные разрушением и трещиноватостью неглубоко залегающих материнских пород;
3. выходы из крупных скоплений по разломам и трещинам;
4. нефтяные просачивания вдоль стратиграфических несогласий горных пород;
5. выходы нефти, обусловленные интрузивными структурами, такими как грязевые вулканы, магматические интрузии и соляные купола.

На практике типы 1 и 2 характерны для ЕН и выходов твердофазных НУ (смола, битума, асфальта) с относительно неглубокими (или даже выходящими на поверхность) источниками или резервуарами. Для типов 3, 4 и 5 (причем тип 5 рассматривается как подкатегория типа 3) характерна ведущая роль тектонических разрывов, разломов и трещиноватости и типичны выходы газа (Etiop, 2015).

Высачивания из моноклиналиных пластов возникают там, где нефтеносные пласты выходят на поверхность. Как правило, такие пласты не изобильны, поскольку нефть медленно движется к выходящему на поверхность участку. Такие просачивания обычно небольшие по объему, но постоянные по активности. Нефтяные просачивания, вызванные разрушением и трещиноватостью неглубоко залегающих материнских пород, высвобождаются в небольших количествах, и на поверхность они почти не попадают. Выходы из крупных скоплений нефти часто образуют самые большие зоны просачиваний. Встречаются просачивания, связанные с несогласиями. Нефть и газ мигрируют другими путями (просачивания с I по 3 типы), пока УВ не достигнут несогласий. Далее УВ мигрируют по несогласию по пути наименьшего сопротивления к поверхности. Из-за непрямого пути миграции часто трудно распознать местонахождение источника в недрах, поскольку обнажения часто разветвляются, как ветви на дереве. Аналогичным образом обильные просачивания антиклинального типа сами по себе указывают на то, что значительный резервуар, возможно, был истощен или находится в процессе истощения. В свою очередь просачивания, обусловленные интрузиями, могут быть как связаны, так и не связаны с коллекторами НУ, расположенными ниже (Link, 1952).

Для оценки связи ЕН и скоплений нефти в (Schumacher, 2011) проводился анализ результатов исследования просачиваний из более чем 2700 разведочных скважин, как на суше, так и на море. В результате из скважин, пробуренных на перспективных участках, на которых наблюдались ЕН, 82% были определены как коммерчески перспективные. Когда только 11% скважин, пробуренных на перспективных участках без сопутствующих просачиваний, привели к открытиям месторождений (Etiop, 2015; Kennicutt, 2017; Schumacher, 2011).

Важно понимать, что связь обнаруженных нефтепроявлений с нефтегазоносностью вовсе не однозначна и что все районы с ЕН не должны разбуриваться, но ЕН должны быть учтены при поиске нефтяных месторождений. Так как известно, что, во-первых, большинство продуктивных бассейнов мира привлекли внимание благодаря нефтепроявлениям, а, во-вторых, нефтеистечения не только доказывают наличие нефтеобразующих пластов, но и могут дать дополнительную информацию о коллекторах и их структуре (Link, 1952).

В работе (Иванов и др., 2007) приводится подробное описание локальных структур, располагающихся в пределах Южно-Каспийской впадины. Район осложнен системой разрывных нарушений, диапиризмом и грязевым вулканизмом. По-

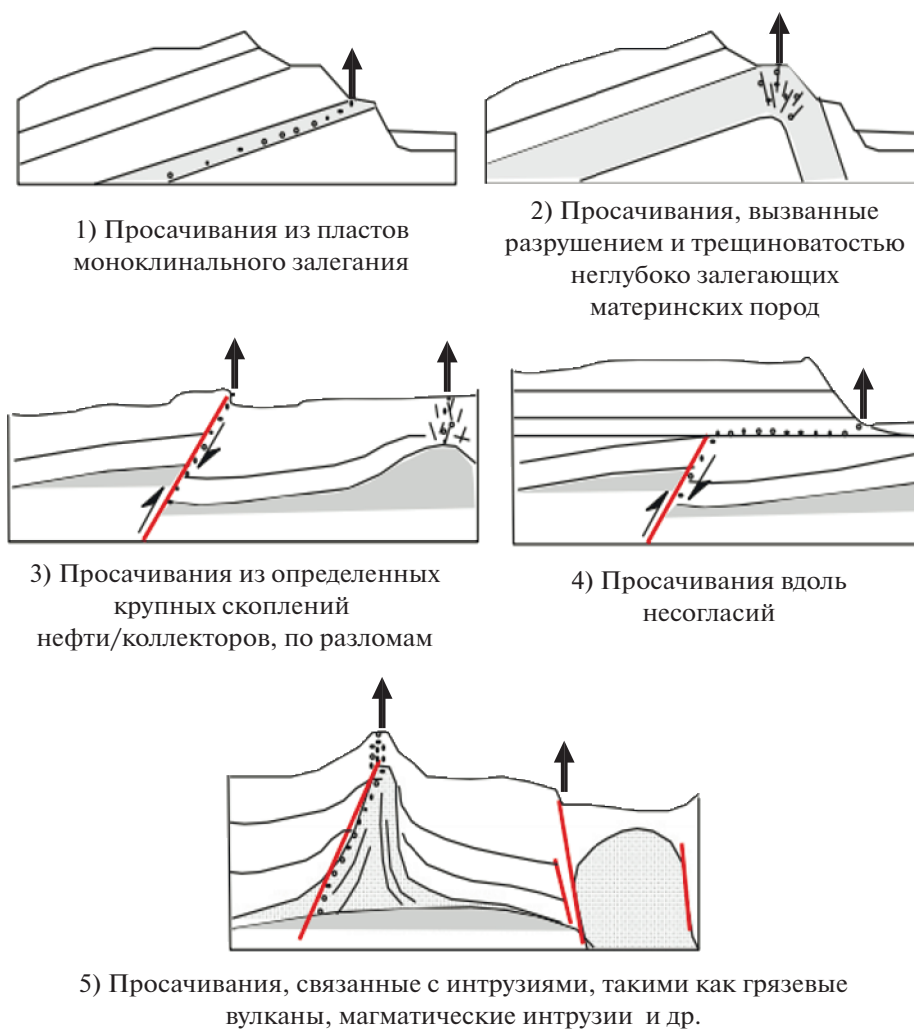


Рис. 10. Пять типов углеводородных просачиваний в зависимости от стратиграфических и геоструктурных условий (Етиопе, 2015).

этому здесь действует весь спектр процессов, которые создают условия для выхода флюидов на дно моря. Более детально этот район на предмет нефтегазоносности с привлечением данных ДЗЗ был изучен Ивановым и др. (2015).

В 2019 г. по данным съемки спутников Sentinel-1A/1B и Sentinel-2A/2B в ЮЗ Каспии было обнаружено 1839 нефтепроявлений (рис. 11). На рисунке синими символами обозначены точки всплытия, а звездочками – подводные грязевые вулканы. Хорошо видно, что большинство ЕН находится в пределах локальных структур, что указывает на их взаимосвязь, а нефтепроявления в пределах нефтегазовых структур однозначно могут указывать на нефтегазоносность района. Более того, некоторые нефтепроявления появляются регулярно, они обширны и находятся в пределах структур D-54, D-7 и D-29, вблизи структур Savalan и D-52 и известных грязевых вулканов, что дает основания отнести их к 3 и 5 типам (рис. 10),

характеризующихся выходами из скоплений нефти и выходами, связанными с интрузиями. Помимо этого, нефтепроявления наблюдались в пределах нефтегазоносной структуры в иранской части моря (Ivanov et al., 2020).

Таким образом, связь нефтепроявлений с нефтегазоносностью является недостаточно ясной. Классификация выходов нефти дает представление об их взаимосвязи, в частности, ЕН, связанные с крупными месторождениями, характеризуются высокой частотой, большими объемами и приуроченностью к нефтегазовым залежам. В свою очередь похожими характеристиками обладают ЕН, обусловленные интрузиями (часто не связанными с коллекторами НУ в недрах). Поэтому космическая информация должна безусловно учитываться при поиске перспективных залежей УВ, но она не является основополагающей.

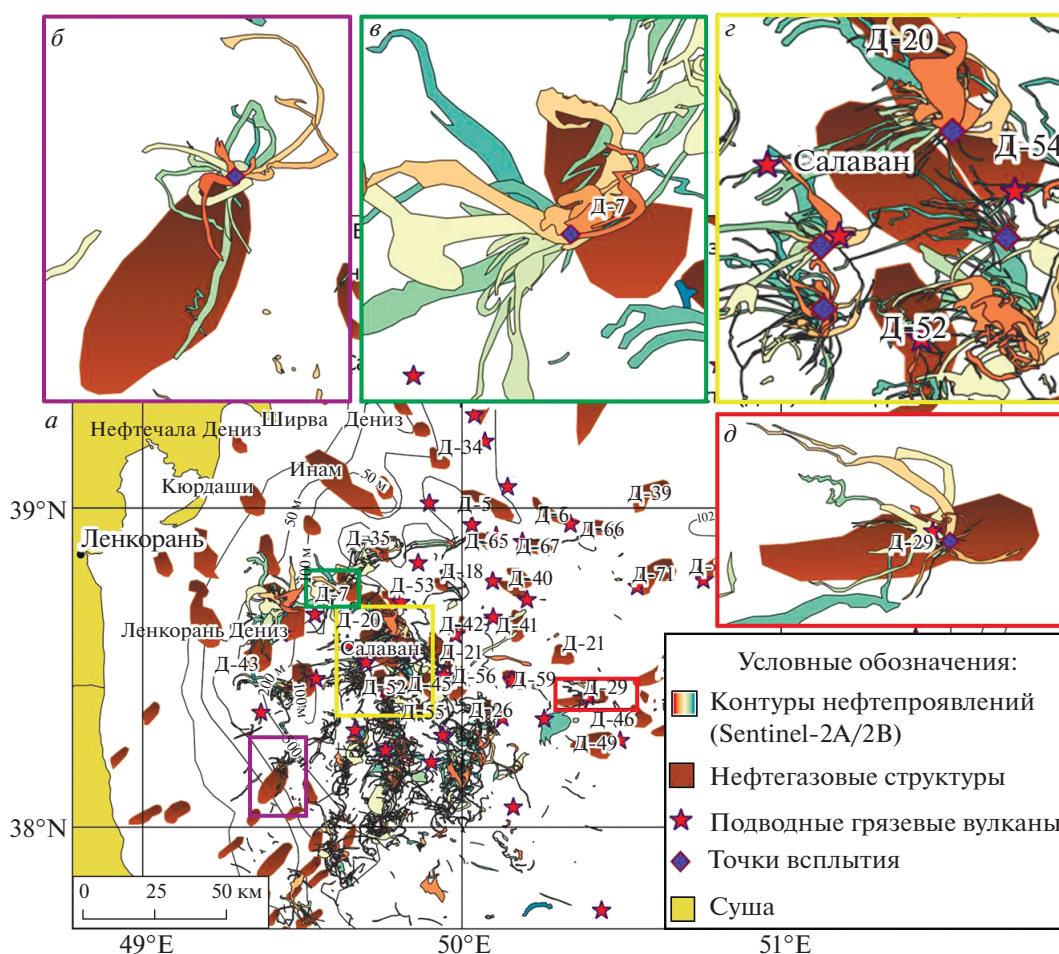


Рис. 11. Распространение ЕН в пределах локальных нефтегазовых структур и грязевых вулканов в ЮЗ части Каспийского моря. На фрагментах: *а* – общая карта с наложенными нефтегазовыми структурами, грязевыми вулканами, контурами обнаруженных нефтепроявлений и выделенными областями наибольшего совпадения; *б–д* – увеличенные фрагменты областей с выделенной точкой всплытия в пределах нефтегазовых структур и вблизи грязевых вулканов. Рисунок составлен по данным космических снимков Sentinel-2A/2B, геологической информации о положении нефтегазовых структур (Иванов и др., 2007) и грязевых вулканов (Алиев, 2006).

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Таким образом, основными значимыми параметрами ЕН, которые можно извлечь из данных ДЗЗ, предлагается считать следующие: форма и размеры, специфика растекания и дрейфа на морской поверхности, частота выбросов и периодичность появления, толщина пленок, объем выбросов, приуроченность к эруптивным формам морского дна, возможная связь с сейсмичностью, тектоникой, грязевым вулканизмом, а также с нефтегазоносностью.

В настоящее время анализ оптических и радиолокационных изображений позволяет определить большинство характеристик ЕН и его подводного источника на дне, состав, интенсивность и объемы выбросов, а также оценить перспективность нефтегазоносности региона.

Местоположение источника на дне с точностью 20–100 м (что определяется как точностью географической привязки снимков, так и точностью определения места всплытия) может быть установлено путем анализа в ГИС пространственно-временной группировки пятен-сликов, обнаруженных на последовательных РЛИ, полученных в течение нескольких месяцев. Наличие повторяющихся друг друга сигнатур на поверхности моря говорит о наличии главного и второстепенных источников на дне (например, грязевого вулкана, осложненного грифонами и сольсами).

Об интенсивности и объемах выбросов может сообщать набор следующих значимых параметров ЕН: форма, размер и время жизни пятен. Форма и размер пятен, измеренные на оптических снимках и РЛИ, могут говорить об интенсивности разгрузки подводного источника и преобладающих гидрометеорологических условиях. Время жизни

ЕН является значимым параметром при получении точных оценок объемов истечений. По оценкам разных авторов считается, что время жизни составляет от 6 до 24 ч. Толщина пленки в ЕН позволяет оценить состав, постоянство и объем нефтевыбросов. Пленки ЕН в большинстве случаев образованы легкими фракциями нефти, толщина которых варьирует в диапазоне от 5 мкм (места всплываний) до 0.04 мкм (на дальней периферии). Оценки объемов выбросов нефти в высокой степени зависят от знания времени жизни пятна на поверхности моря и знания толщины пленки в пятне, в то время как площадь пятна может быть измерена на космических снимках достаточно точно.

Связь с сейсмичностью неоднозначна (хотя ранее утверждалось противоположное), что было показано для 2019 г. В связи с тем, что возникновение ЕН может происходить до землетрясения, во время землетрясения, а также через несколько дней и даже недель после него, нефтепроявления не могут рассматриваться в качестве индикаторов сейсмоактивности региона, а также в качестве предвестников землетрясения.

Для оценки перспективности морского региона на нефть и газ с помощью данных ДЗЗ необходимо проводить анализ всех обнаруженных ЕН в ГИС совместно с априорной геолого-геофизической информацией. Согласно приведенной в настоящем обзоре классификации просачиваний, ЕН, связанные с крупными залежами НУ, характеризуются высокой частотой, большими объемами и приуроченностью к нефтегазовым структурам. В свою очередь, похожими характеристиками обладают просачивания интрузионного типа, которые могут быть и не связаны с коллекторами УВ в недрах морского дна. Тем не менее, космическая информация должна учитываться при поиске перспективных залежей углеводородов, но она не должна являться основной и самодостаточной.

Из ограничений методов ДЗЗ отметим следующее: 1) толщина пленки, как ключевой параметр в расчетах, до сих пор со спутников не измеряется, в связи с этим для расчетов используется широкий диапазон оценок, например, от 0.1 до 1 мкм; 2) время жизни пленки каждый раз определить сложно, однако не невозможно; 3) в связи с этим общие оценки объемов поступающей нефти для той или иной акватории существенно различаются. Кроме того, частым ограничением применения данных ДЗЗ при исследовании ЕН и их источников является недоступность или отсутствие необходимых априорных данных.

В настоящее время широко распространенным инструментом, позволяющим картографировать морское дно в 2D, становится подспутниковая акустическая гидролокация с помощью ГБО. Та-

кие совместные исследования с использованием данных ДЗЗ и ГБО позволят полностью охарактеризовать тот или иной подводный источник НУ в Мировом океане.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Систематизация и обобщение результатов исследований естественных нефтепроявлений и их взаимосвязи с подводными источниками нефти крайне важны в свете современных научных тенденций. В обзоре обобщены результаты исследований естественных нефтепроявлений в море, рассмотрены их типичные характеристики, которые могут быть получены путем обработки и анализа данных космической радиолокационной и оптической съемки, а также современные способы их определения. На конкретных примерах для Каспийского моря продемонстрирована необходимость комплексного анализа данных дистанционного зондирования и различной априорной информации для восстановления значимых параметров естественных нефтепроявлений и их подводных источников. Показано, что сосредоточенность пятен-сликов в том или ином месте, выявленная по временному ряду данных спутникового мониторинга в течение некоторого периода времени (от месяца до полугода), однозначно указывает на наличие подводного источника на дне.

Поиск, обнаружение и исследование естественных нефтепроявлений необходимы по ряду причин, в частности, эта информация крайне важна в задачах исследования нефтегазоносности, безопасности морской нефте- и газодобычи и даже в задачах изучения климата. Помимо того, что нефтепроявления способствуют индикации залежей углеводородов, они являются еще источниками естественного загрязнения, которое необходимо учитывать в общих и частных оценках антропогенного загрязнения морей. Показано, что исследования естественных нефтепроявлений с помощью данных дистанционного зондирования при правильной постановке задачи, использовании их характеристик, а также при интеграции с геолого-геофизическими данными позволяют получать дополнительную информацию о возможной нефтегазоносности той или иной акватории, перспективах и рисках морских нефтеразработок, включая ее экологическое состояние. Рассмотренные в работе методы и подходы позволили обнаружить, изучить и верифицировать естественные нефтепроявления в ряде мест Баренцева, Азовского, Черного, Каспийского и Охотского морей, а также в оз. Байкал.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 0128-2021-0001, FNEE-2021-0002 и Соглашения № 075-15-2020-776.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алиев Ад.А.* Грязевой вулканизм Южно-Каспийского нефтегазоносного бассейна // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2006. № 3. С. 35–51.
- Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / под ред. В.Г. Бондура. М.: Научный мир. 2012. 558 с.
- Бескид П.П., Дурягина Е.Г.* Характеристика процессов трансформации нефти в морской среде и их влияние на операции по ликвидации аварийных разливов нефти // Эксплуатация морского транспорта. 2011. № 1 (63). С. 71–75.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмический мониторинг нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса. Реальности и перспективы // Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса. М.: Научный мир, 2012. С. 15–37.
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Исследования полей течений и загрязнений прибрежных вод на Геленджикском шельфе Черного моря с использованием космических данных // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 4. С. 3–11.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Изменчивость внутренних приливов в прибрежной акватории о. Оаху (Гавайи) // Океанология. 2008. Т. 48. № 5. С. 661–671.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Спектральные характеристики и кинематика короткопериодных внутренних волн на Гавайском шельфе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 5. С. 641–651.
- Бондур В.Г., Замшин В.В.* Космический радиолокационный мониторинг морских акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов // Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса. Под ред. В.Г. Бондура. М.: Научный мир, 2012. С. 255–271.
- Бондур В.Г., Кузнецова Т.В.* Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 30–43.
<https://doi.org/10.7868/S020596141504003X>
- Бондур В.Г., Журбас В.М., Гребенюк Ю.В.* Математическое моделирование турбулентных струй глубинных стоков в прибрежные акватории // Океанология. 2006. Т. 46. № 6. С. 805–820.
- Бондур В.Г., Зубков Е.В.* Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многозональным спутниковым изображениям высокого разрешения. Часть 1. Эффекты сброса дренажных каналов в прибрежные акватории // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54–61.
- Бондур В.Г., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В., и др.* Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 827–846.
- Бондур В.Г., Кузнецова Т.В.* Исследование естественных нефте- и газопроявлений на водной поверхности по космическим изображениям // Актуальные проблемы нефти и газа. 2012. № 2(6). С. 1–10.
- Гаврилов В.П.* Космический мониторинг современных процессов образования углеводородов / “Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса”. Под ред. В.Г. Бондура. М.: Научный мир. 2012. С. 38–49.
- Гасанов А.Г., Керамова Р.А., Агапов Н.И.* Связь сейсмичности, грязевого вулканизма, появления геохимических аномалий в подземных водах Каспийского региона // Отечественная геология. 2005. № 1. 69–72.
- Евтушенко Н.В., Иванов А.Ю.* Нефтепроявления в юго-восточной части Черного моря по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 3. С. 24–30.
- ЕГС РАН. Информация о землетрясениях 2019 (<http://www.gsras.ru/new/ssd.htm>).
- Затягалова В.В.* О некоторых особенностях естественных выходов углеводородов в восточной части Азово-Черноморского бассейна // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 194–201.
- Иванов А.Ю.* Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
- Иванов А.Ю.* Нефтепроявления на поверхности озера Байкал // Исслед. Земли из космоса, 2010. № 2. С. 75–87.
- Иванов А.Ю.* Естественные нефтепроявления в Каспийском и Баренцевом морях: обнаружение и анализ по данным дистанционного зондирования // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 5. С. 52–64.
[https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(5\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(5).4)
- Иванов А.Ю., Голубов Б.Н., Затягалова В.В.* О нефтегазоносности и разгрузке подземных флюидов в южной части Каспийского моря по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 62–81.
- Иванов А.Ю., Голубов Б.Н., Терлеева Н.В.* Сравнительный анализ распределения естественных нефтепроявлений в юго-западной части Каспийского моря по данным космической радиолокации с оценкой нефтегазоносности недр // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 6. С. 47–61.
- Иванов А.Ю., Затягалова В.В.* Картографирование пленочных загрязнений моря с использованием космической радиолокации и географических информационных систем // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 46–63.
- Иванов А.Ю., Матросова Е.Р.* Техногенная грифонная активность в северо-западной части Черного моря по данным съемок из космоса // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 8. С. 57–63.
- Иванов А.Ю., Матросова Е.Р., Кучейко А.Ю. и др.* Поиск и обнаружение естественных нефтепроявлений в

- морях России по данным космической радиолокационной съемки // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 5. С. 43–62.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420050061>
- Клименко С.К., Иванов А.Ю., Терлеева Н.В.* Пленочные загрязнения Керченского пролива по данным пятилетнего радиолокационного мониторинга: современное состояние и основные источники // Исслед. Земли из космоса. 2022 (в печати).
- Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
- Лебедев С.А., Костяной А.Г., Гинзбург А.И.* Динамика Каспийского моря по данным инструментальных измерений, результатам моделирования и данным дистанционного зондирования / Материалы III Межд. научно-практической конференции “Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий”. Майкоп, 2015. С. 146–179.
- Лимонов А.Ф.* Грязевые вулканы // Соросовский образовательный журнал. 2004. Т. 8. № 1. С. 63–69.
- Митягина М.И.* Распространение пленок естественных нефтепроявлений на морской поверхности юго-восточной части Черного моря по данным многолетних спутниковых наблюдений // Вестник ТГУ. Сер. геогр. и геоэкол. 2018. № 3. С. 125–136.
- Митягина М.И., Лаврова О.Ю.* Выход естественных углеводородов со дна Каспийского моря в районе туркменского шельфа, выявленный по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 292–298.
- Овсиенко С.Н., Зацепя С.Н., Ивченко А.А.* Моделирование разливов нефти и оценка риска воздействия на окружающую среду // Труды ГОИН: Вып. 209. М.: Гидрометеиздат, 2005. С. 248–271.
- Патин С.А.* Нефть и экология континентального шельфа. Т. 1. Морской нефтегазовый комплекс: состояние, перспективы, факторы воздействия. М.: Изд-во ВНИРО, 2017. 326 с.
- Сизов О.С., Лобжанидзе Н.Е., Чудакова М.А.* Мониторинг естественных нефтепроявлений вдоль северо-восточного побережья острова Сахалин на основе радиолокационных и оптических данных ДЗЗ // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2020. № 2. С. 63–69.
[https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-2\(293\)-63-69](https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-2(293)-63-69)
- Становой В.В., Лавренов И.В., Неелов И.А.* Система моделирования разливов нефти в ледовитых морях // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 77. С. 7–16.
- Холодов В.Н.* Грязевые вулканы: распространение и генезис // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2012. № 4. С. 5–27.
- Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гнатенко Г.И. и др.* Грязевые вулканы Керченско-Таманской области. Атлас. Киев. Наукова Думка, 1986, 152 с.
- Шнюков Е.Ф., Алиев Ад.А., Рахманов Р.Р.* Грязевой вулканизм Средиземного, Черного и Каспийского морей: Специфика развития и проявления // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2017. № 2. С. 5–25.
- Aminzadeh F., Berge T.B., Connolly D.L.* Hydrocarbon seepage: From source to surface. Society of Exploration Geophysicists and AAPG, 2013. 253 p.
<https://doi.org/10.1190/1.9781560803119>
- ASTM (American Society for Testing and Materials International). Guide for visually estimating oil spill thickness on water, 2017.
- BAOAC (Bonn Agreement Aerial Operations Handbook). The Netherlands: Bonn Agreement, 2016. 123 p.
- Bondur V.* Complex satellite monitoring of coastal water areas // Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. 7p.
- Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modeling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // Waste Water – Evaluation and Management, InTech, Croatia. 2011. P. 155–180. <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>.
- Bondur V., Tsidilina M.* Features of formation of remote sensing and sea truth databases for the monitoring of anthropogenic impact on ecosystems of coastal water areas // Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 192–195.
- Bondur V.G., Zamshin V.V.* Comprehensive ground-space monitoring of anthropogenic impact on Russian Black Sea coastal water area, Eds K.V. Anisimov et al., Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Research and Development – 2016”, 2018. P. 625–637.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7>.
- Crude Accountability, 2013 (<https://crudeaccountability.org/wp-content/uploads/2013/05/20130506-HiddenIn-PlainSight.pdf>).
- Daneshgar Asl S., Dukhovskoy D., Bourassa M., MacDonald I.R.* Hindcast modeling of oil slick persistence from natural seeps // Remote Sens. Environ. 2017. V. 189. P. 96–107.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.003>
- Espedal H.A., Wahl T.* Satellite SAR oil spill detection using wind history information // Int. J. Remote Sens. 1999. V. 20. P. 49–65.
<https://doi.org/10.1080/014311699213596>
- Etiop G.* Seepage in Field Geology and Petroleum Exploration. Natural Gas Seepage. Cham: Springer International Publishing, 2015.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-14601-0_5
- Fingas M.* The challenges of remotely measuring oil slick thickness // Remote Sens. 2018. V. 10. № 2. P. 319.
<https://doi.org/10.3390/rs10020319>
- Geersen J., Scholz F., Linke P. et al.* Fault zone controlled seafloor methane seepage in the rupture area of the 2010 Maule Earthquake, Central Chile // Geochem. Geophys. Geosyst. 2016. V. 17. P. 4802–4813.
<https://doi.org/10.1002/2016GC006498>
- ГОПФ, 2015. Воздушное наблюдение морских разливов нефти.
https://www.ospri.online/site/assets/files/1130/aerial-observation_ru.pdf.
- Ivanov A. Yu., Gerivani H.* Oil leaking and seeping site in the Persian Gulf detected and studied by satellite observations // Mar. Georesour. Geotec. 2020.
<https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1853286>

- Ivanov A. Yu., Gerivani H., Evtushenko N.V.* Characterization of natural hydrocarbon seepage in the South Caspian Sea off Iran using satellite SAR and geological data // *Mar. Georesour. Geotec.* 2020. V. 38. № 5. P. 527–538. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2019.1600175>
- Ivanov A. Yu., Morović M.* Oil seeps detection and mapping by SAR imagery in the Adriatic Sea // *Acta Adriatica.* 2020. V. 61(1). P. 13–26. <https://doi.org/10.32582/aa.61.1.1>
- Keeler R., Bondur V., Vithanage D.* Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology.* 2004. P. 53–58.
- Kennicutt M.C.* Oil and gas seeps in the Gulf of Mexico // *Habitats and biota of the Gulf of Mexico: before the Deep-water Horizon oil spill: V. 1.* Ed. C.H. Ward. Springer, New York, 2017. P. 275–358. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3447-8_5
- Klemas V.* Tracking oil slicks and predicting their trajectories using remote sensors and models: Case studies of the Sea Princess and Deepwater Horizon oil spills // *J. Coastal Res.* 2010. V. 26. N 5. P. 789–797. <https://doi.org/10.2112/10A-00012>
- Kvenvolden K.A., Cooper C.K.* Natural seepage of crude oil into the marine environment // *Geo-Mar. Lett.* 2003. 23(3–4). P. 140–146. <https://doi.org/10.1007/s00367-003-0135-0>
- Leifer I.A.* Synthesis review of emissions and fates for the Coal Oil Point marine hydrocarbon seep field and California marine seepage // *Geofluids.* 2019. V. 2019. ID 4724587. 48 p. <https://doi.org/10.1155/2019/4724587>
- Link W.K.* Significance of oil and gas seeps in world oil exploration // *AAPG Bull.* 1952. V. 36. № 8. P. 1505–1540.
- Liungman O., Mattson J.* Scientific documentation of Seatrack Web; physical processes, algorithms and references. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 2011 (<https://stw-helcom.smlhi.se/>).
- Macdonald I., Guinasso N., Ackleson S. et al.* Natural oil slicks in the Gulf of Mexico visible from space // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. C9. P. 16351–16364. <https://doi.org/10.1029/93JC01289>
- MacDonald I.* Natural oil spills // *Sci. Am.* 1998. V. 279. P. 56–61. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican1198-56>
- MacDonald I., Garcia-Pineda O., Beet A. et al.* Natural and unnatural oil slicks in the Gulf of Mexico // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2015. V. 12. № 120. P. 8364–8380. <https://doi.org/10.1002/2015JC011062>
- Najoui Z., Riazanoff S., Deffontaines B., Xavier J-P.* Estimated location of the seafloor sources of marine natural oil seeps from sea surface outbreaks: A new “source path procedure” applied to the northern Gulf of Mexico // *Mar. Pet. Geol.* 2018. V. 91. P. 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.12.035>
- NOAA, 2016. Open water oil identification job aid for aerial observation with standardized oil slick appearance and structure nomenclature and codes. Office of Response and Restoration, Ver. 3. (https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/OWJA_2016.pdf).
- Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. The National Academies Press, Washington, 2003.
- Schumacher D.* Pre-drill prediction of hydrocarbon charge: microseepage-based prediction of charge and post-survey drilling results / AAPG International Conference and Exhibition, Oct. 23–26, 2011, Milan, Italy (https://www.search-anddiscovery.com/pdfz/documents/2011/40841schumacher/ndx_schumacher.pdf.htm).
- Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E. et al.* Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // *Ocean Science.* 2018. V. 14. № 1. P. 87–103. <https://doi.org/10.5194/os-14-87-2018>
- Sun S., Hu C., Garcia-Pineda O. et al.* Remote sensing assessment of oil spills near a damaged platform in the Gulf of Mexico // *Mar. Pollut. Bull.* 2018. V. 136. P. 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.09.004>
- Vasilev A., Tsekov M., Petsinski P. et al.* New possible earthquake precursor and initial area for satellite monitoring // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 8. ID 586283. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.586283>

Determination of Characteristics of Natural Oil Seeps and Their Underwater Sources from Remote Sensing Data

E. R. Matrosova¹, V. N. Khodaeva¹, and A. Yu. Ivanov^{1, 2}

¹*AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia*

²*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

The basic characteristics of natural oil seeps and possibilities of their determination according to space radar and optical imagery are considered and systematized. It is shown that the analysis of successive optical and radar surveys makes it possible to determine the characteristics of natural oil seeps discussed in the work, by which it becomes possible to assess the location of their underwater sources, intensity and volume of emissions, geophysical state and prospects of oil and gas content in the region. The possibilities, limitations, and prospects of application of remote sensing data in these tasks are discussed. The review character of the work made it possible to take into account modern methods and results of the recent studies of natural oil seeps using remote sensing data.

Keywords: natural oil seeps, sea surface, remote sensing, SAR images, optical images, oil and gas content

REFERENCES

- Aliiev A.A.* Gryazevoi vulkanizm Yujno_Kaspiiskogo neftegazonosnogo basseina [Mud volcanism of the South Caspian oil and gas bearing basin] // *Geology and Mineral Resources of World Ocean*. 2006. № 3. P. 35–51 (In Russian).
- Aerospace Monitoring of Objects of Oil and Gas Facilities. Ed. V. G. Bondur, Moscow: Scientific World. 2012. 558 P. (In Russian)
- Beskid P.P., Duryagina E.G.* Harakteristika processov transformacii nefti v morskoi srede i ih vliyaniye na operacii po likvidacii avariinnykh razlivov nefti [The characteristic of processes of transformation of oil in the sea environment and their influence on operations on liquidation of emergency spills] // *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. 2011. № 1(63). P. 71–75. (In Russian)
- Bondur V.G.* Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018. (In Russian)
<https://doi.org/10.1134/S0001433811090039>
- Bondur V.G.* Aerokosmicheskii monitoring neftegazonosnykh territorii i obektov neftegazovogo kompleksa. Real'nosti i perspektivy [Aerospace monitoring of oil and gas-bearing areas and objects of the oil and gas complex. Realities and perspectives] / "Aerospace monitoring of oil-and-gas facilities" ed. V.G. Bondura. Moscow: Scientific World. 2012. P. 15–37. (In Russian)
- Bondur V.G., Vorobjev V.E., Grebenjuk Y.V., Sabinin K.D., Serebryany A.N.* Study of fields of currents and pollution of the coastal waters on the Gelendzhik Shelf of the Black Sea with space data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. V. 49. № 9. P. 886–896. (In Russian).
<https://doi.org/10.1134/S000143381309003X>
- Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V., Sabinin K.D.* Variability of internal tides in the coastal water area of Oahu Island (Hawaii) // *Oceanology*. 2008. V. 48. № 5. P. 611–621. (In Russian)
<https://doi.org/10.1134/S0001437008050019>
- Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V., Sabinin K.D.* The spectral characteristics and kinematics of short-period internal waves on the Hawaiian shelf // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2009. V. 45. № 5. P. 598–607. (In Russian)
<https://doi.org/10.1134/S0001433809050077>
- Bondur V.G., Kuznetsova T.V.* Detecting Gas Seeps in Arctic Water Areas Using Remote Sensing Data. // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. V. 51. № 9. P. 1060–1072. (In Russian)
<https://doi.org/10.1134/S0001433815090066>
- Bondur V.G., Zamshin V.V.* Kosmicheskii radiolokatsionnyy monitoring morskikh akvatoriy v rayonakh dobychi i transportirovki uglevodorodov [Space radar monitoring of offshore regions in the areas of hydrocarbon production and transportation] / "Aerospace monitoring of oil-and-gas facilities" ed. V.G. Bondura. Moscow: Scientific World. 2012. P. 255–271. (In Russian)
- Bondur V.G., Zubkov E.V.* Vydelenie melkomasshtabnykh neodnorodnostey opticheskikh kharakteristik verkhnego sloya okeana po mnogoazonalnym sputnikovym izobrazheniyam vysokogo razresheniya. Chast 1. Effekty sbrosa drenazhnykh kanalov v pribrezhnyye akvatorii (Showing up the small-scale ocean upper layer optical inhomogeneities by the multispectral space images with the high surface resolution. Part 1. The canals and channels drainage effects at the coastal zone) // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2005. № 4. P. 54–61. (In Russian)
- Bondur V.G., Filatov N.N., Grebenyuk Yu.V. et al.* Studies of hydrophysical processes during monitoring of the anthropogenic impact on coastal basins using the example of Mamala Bay of Oahu Island in Hawaii // *Oceanology*. 2007. V. 47. № 6. P. 769–787. (In Russian)
<https://doi.org/10.1134/S0001437007060033>
- Bondur V.G., Kuznetsova T.V.* Issledovanie estestvennykh nefte- i gazoprovyavlenii na vodnoi poverhnosti po kosmicheskim izobrazheniyam [Investigation of natural oil and gas occurrences on the water surface by space images] // *Actual problems of oil and gas*. 2012. № 2(6). P. 1–10. (In Russian)
- Gavrilov V.P.* Kosmicheskii monitoring sovremennykh processov obrazovaniya uglevodorodov [Space monitoring of modern hydrocarbon formation processes] / *Aerospace Monitoring of Oil-and-Gas Facilities*. Ed. V.G. Bondur. Moscow: Scientific World. 2012. P. 38–49. (In Russian)
- Gasarov A.G., Keramova R.A., Agapov N.I.* Svyaz seismichnosti, gryazevogo vulkanizma, poyavleniya geokhimicheskikh anomalii v podzemnykh vodakh Kaspiiskogo regiona [Relationship seismicity, mud volcanism, the appearance of geochemical anomalies in the groundwater of the Caspian region] // *Otechestvennaya geologiya*. 2005. № 1. P. 69–72. (In Russian)
- Evtushenko N.V., Ivanov A.Yu.* Nefteproyavleniya v yugo-vostochnoi chasti Chernogo morya po dannim kosmicheskoi radiolokacii [Oil seeps in the Southeastern Black Sea studied from space using SAR images] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2012. № 3. P. 24–30. (In Russian)
- EGS RAS. Earthquake information 2019 (<http://www.gsr.ru/new/ssd.htm>).
- Zatyagalova V.V.* O nekotorykh osobennostyakh yestestvennykh vykhodov uglevodoroda v vostochnoy chasti Azovo-Chernomorskogo basseina [On some specifics natural hydrocarbon seeps in the eastern part of the Azov and Black Sea basins] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012. V. 9. № 4. P. 194–201. (In Russian)
- Ivanov A.Yu.* Sliki i plenochnie obrazovaniya na kosmicheskikh radiolokatsionnykh izobrazheniyakh [Slicks and film formations in space radar images] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2007. № 3. P. 73–96. (In Russian)
- Ivanov A.Yu.* Nefteproyavleniya na poverhnosti ozera Baikal [Oil occurrences on the surface of Lake Baikal] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2010. № 2. P. 75–87. (In Russian)
- Ivanov A.Yu.* Remote sensing detection and analysis of oil seeps in the Caspian Sea and the Barents Sea // *J. Oceanological Research*. 2019. V. 47. P. 52–64. (In Russian)
[https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(5\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(5).4)
- Ivanov A.Yu., Golubov B.N., Zatyagalova V.V.* O neftegazonosnosti i razgruzke podzemnykh flyuidov v yujnoi chasti Kaspiiskogo morya po dannim kosmicheskoi radiolokacii [On oil-gas-bearing and unloading of underground fluids in the southern part of the Caspian Sea using synthetic aperture radar images] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2007. № 2. P. 62–81. (In Russian)
- Ivanov A.Yu., Golubov B.N., Terleeva N.V.* Sravnitel'nyy analiz raspredeleniya yestestvennykh nefteproyavleniy v yugo-zapadnoy chasti Kaspiyskogo morya po dannym kosmi-

- cheskoy radiolokatsii s otsenkoy neftegazonosnosti neдр [Comparative analysis of oil seep slick distribution in the Southern Caspian Sea with estimation of oil and gas bearing using satellite SAR images] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2015. № 6. P. 47–61. (In Russian)
- Ivanov A.Yu., Zatyagalova V.V.* Kartografirovaniye plenochnykh zagryazneniy morya s ispol'zovaniyem kosmicheskoy radiolokatsii i geograficheskikh informatsionnykh sistem [Mapping oil spills in the marine environment using satellite radar imagery and geographic information systems] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2007. № 6. P. 46–63. (In Russian)
- Ivanov A.Yu., Matrosova E.R.* Tekhnogennaya grifonnaya aktivnost' v severo-zapadnoy chasti Chernogo morya po dannym s'yemok iz kosmosa [Technogenically provoked seepage activity in the Northwestern Black Sea according to data from space] // *Ecology and Industry of Russia*. 2019. V. 23. № 8. P. 57–63 (In Russian).
- Ivanov A.Yu., Matrosova E.R., Kucheiko A.Yu. et al.* Search and Detection of Natural Oil Seeps in the Russian Seas Using Spaceborne SAR Imagery // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2020. № 5. P. 43–62. (In Russian)
<https://doi.org/10.31857/S0205961420050061>
- Klimenko S.K., Ivanov A.Yu., Terleeva N.V.* Film pollution of Kerch Strait according to the five-year radar monitoring: current state and main sources // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2022. (In Russian) (in print).
- Lavrova O.Yu., Kostianoy A.G., Lebedev S.A. et al.* Complex Satellite Monitoring of the Russian Seas, Moscow: IKI RAN, 2011, 470 p. (In Russian)
- Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Ginzburg A.I.* Dynamics of the Caspian Sea based on instrumental measurements, modeling results and remote sensing data // *Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference “Applied aspects of geology, geophysics and geoecology using modern information technologies”*. Maykop, 2015. P. 146–179. (In Russian)
- Limonov A.F.* Gryazevie vulkani [Mud volcanoes] // *Sorosovskii obrazovatel'nyi jurnal*. 2004. V. 8. № 1. P. 63–69. (In Russian)
- Mityagina M.I.* Rasprostraneniye plenok estestvennykh nefteproyavlenii na morskoi poverhnosti yugo-vostochnoi chasti Chernogo morya po dannim mnogoletnih sputnikov-ih nablyudeniim [Distribution of films of natural oil occurrences on the sea surface of the south-eastern part of the Black Sea according to long-term satellite observations] // *Vestnik TGU. Ser. geogr. i geokol.* 2018. № 3. P. 125–136. (In Russian)
- Mityagina M.I., Lavrova O.Yu.* A point of petroleum hydrocarbons emission from the seabed in the Turkmenian shelf area of the Caspian Sea discovered via satellite data // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. V. 17. № 2. P. 292–298. (In Russian)
- Ovsienko S.N., Zatsapa S.N., Ivchenko A.A.* Modelirovaniye razlivov nefi i ochenka riska vozdeistviya na okrujayuschuyu sredu [Modeling oil spills and risk assessment of environmental impact] // *Trudi GOIN*. V. 209. Moscow: Gidrometeoizdat. 2005. P. 248–271. (In Russian)
- Patin S.A.* Oil and continental shelf ecology: in two volumes. 2nd edition revised and extended. V. 1: offshore oil and gas industry: present situation, prospects, factors of impact. Moscow: VNIRO, 2017. 326 p. (In Russian)
- Sizov O.S., Lobzhanidze N.E., Chudakova M.A.* Monitoring of natural fluid slicks along the north-eastern coast of Sakhalin island based on radar and optical data of earth remote sensing // *Environmental Protection in Oil and Gas Complex*. 2020. № 2. P. 63–69. (In Russian)
[https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-2\(293\)-63-69](https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-2(293)-63-69)
- Stanovoy V.V., Lavrenov I.V., Neelov I.A.* Sistema modelirovaniya razlivov nefi v ledovitykh moryakh [Oil modeling system for ice-infested seas] // *Problemi Arktiki i Antarktiki*. 2007. V. 77. P. 7–16. (In Russian)
- Kholodov V.N.* Gryazevie vulkani rasprostraneniye i genesis [Mud volcanoes: distribution and genesis] // *Geologiya i poleznie iskopaemiy Mirovogo okeana*. 2012. № 4. P. 5–27. (In Russian)
- Shnyukov E.F., Sobolevsky Yu.V., Gnatenko G.I. et al.* Gryazevie vulkani Kerchensko-Tamanskoi oblasti. Atlas. [Mud volcanoes of the Kerch-Taman region. Atlas.] // *Kiev. Naukova Dumka*, 1986. 152 p. (In Russian)
- Shnyukov E.F., Aliev A.A., Rakhmanov R.R.* Gryazevoi vulkanizm Sredizemnogo, Chernogo i Kaspiiskogo morei. Specifika razvitiya i proyavleniya [Mud volcanism of Mediterranean, Black and Caspian seas: specificity of development and manifestations] // *Geologiya i poleznie iskopaemiy Mirovogo okeana*. 2017. № 2. P. 5–25. (In Russian)
- Aminzadeh F., Berge T.B., Connolly D.L.* Hydrocarbon seepage: From source to surface. Society of Exploration Geophysicists and AAPG, 2013. 253 p.
<https://doi.org/10.1190/1.9781560803119>
- ASTM (American Society for Testing and Materials International). Guide for visually estimating oil spill thickness on water, 2017.
- BAOAC (Bonn Agreement Aerial Operations Handbook). The Netherlands: Bonn Agreement, 2016. 123 p.
- Bondur V.* Complex satellite monitoring of coastal water areas // *Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment*. ISRSE, 2005. 7p.
- Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modeling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // *Waste Water – Evaluation and Management*. InTech, Croatia. 2011. P. 155–180.
<http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>.
- Bondur V., Tsidilina M.* Features of formation of remote sensing and sea truth databases for the monitoring of anthropogenic impact on ecosystems of coastal water areas // *Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment*. ISRSE, 2005. P. 192–195.
- Bondur V.G., Zamshin V.V.* Comprehensive ground-space monitoring of anthropogenic impact on russian black sea coastal water areas. Eds. K.V. Anisimov et al., *Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Research and Development – 2016”*, 2018. P. 625–637.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7>
- Crude Accountability, 2013 (<https://crudeaccountability.org/wp-content/uploads/2013/05/20130506-HiddenInPlainSight.pdf>).
- Daneshgar Asl S., Dukhovskoy D., Bourassa M., MacDonald I.R.* Hindcast modeling of oil slick persistence from natural seeps // *Remote Sens. Environ.* 2017. 189. P. 96–107.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.003>

- Espedal H.A., Wahl T.* Satellite SAR oil spill detection using wind history information // *Int. J. Remote Sens.* 1999. 20. P. 49–65.
<https://doi.org/10.1080/014311699213596>
- Etioppe G.* Seepage in Field Geology and Petroleum Exploration. Natural Gas Seepage. Cham: Springer International Publishing, 2015 https://doi.org/10.1007/978-3-319-14601-0_5.
- Fingas M.* The challenges of remotely measuring oil slick thickness // *Remote Sens.* 2018. V. 10. № 2. P. 319.
<https://doi.org/10.3390/rs10020319>
- Geersen J., Scholz F., Linke P. et al.* Fault zone controlled seafloor methane seepage in the rupture area of the 2010 Maule Earthquake, Central Chile // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2016. 17. P. 4802–4813.
<https://doi.org/10.1002/2016GC006498>
- ИТОПФ, 2015. Aerial observation of oil spills at sea. https://www.ospri.online/site/assets/files/1130/aerial-observation_ru.pdf.
- Ivanov A. Yu., Gerivani H.* Oil leaking and seeping site in the Persian Gulf detected and studied by satellite observations // *Mar. Georesour. Geotec.* 2020.
<https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1853286>
- Ivanov A. Yu., Gerivani H., Evtushenko N.V.* Characterization of natural hydrocarbon seepage in the South Caspian Sea off Iran using satellite SAR and geological data // *Mar. Georesour. Geotec.* 2020. V. 38. № 5. P. 527–538.
<https://doi.org/10.1080/1064119X.2019.1600175>
- Ivanov A. Yu., Morović M.* Oil seeps detection and mapping by SAR imagery in the Adriatic Sea // *Acta Adriatica.* 2020. V. 61(1). P. 13–26.
<https://doi.org/10.32582/aa.61.1.1>
- Keeler R., Bondur V., Vithanage D.* Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology.* 2004. P. 53–58.
- Kennicutt M.C.* Oil and gas seeps in the Gulf of Mexico // *Habitats and biota of the Gulf of Mexico: before the Deepwater Horizon oil spill: V. 1.* Ed. C.H. Ward. Springer, New York, 2017. P. 275–358.
https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3447-8_5
- Klemas V.* Tracking oil slicks and predicting their trajectories using remote sensors and models: Case studies of the Sea Princess and Deepwater Horizon oil spills // *J. Coastal Res.* 2010. V. 26. N 5. P. 789–797.
<https://doi.org/10.2112/10A-00012>
- Kvenvolden K.A., Cooper C.K.* Natural seepage of crude oil into the marine environment // *Geo-Mar. Lett.* 2003. 23(3–4). P. 140–146.
<https://doi.org/10.1007/s00367-003-0135-0>
- Leifer I.A.* Synthesis review of emissions and fates for the Coal Oil Point marine hydrocarbon seep field and California marine seepage // *Geofluids.* 2019. V. 2019. ID 4724587. 48 p.
<https://doi.org/10.1155/2019/4724587>
- Link W.K.* Significance of oil and gas seeps in world oil exploration // *AAPG Bull.* 1952. V. 36. № 8. P. 1505–1540.
- Liungman O., Mattson J.* Scientific documentation of Seatrack Web; physical processes, algorithms and references. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 2011 (<https://stw-helcom.smhi.se.>)
- MacDonald I., Guinasso N., Ackleson S. et al.* Natural oil slicks in the Gulf of Mexico visible from space // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. C9. P. 16351–16364.
<https://doi.org/10.1029/93JC01289>
- MacDonald I.* Natural oil spills // *Sci. Am.* 1998. V. 279. P. 56–61.
<https://doi.org/10.1038/scientificamerican1198-56>
- MacDonald I., Garcia-Pineda O., Beet A. et al.* Natural and unnatural oil slicks in the Gulf of Mexico // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2015. V. 12. № 120. P. 8364–8380.
<https://doi.org/10.1002/2015JC011062>
- Najoui Z., Riazanoff S., Deffontaines B., Xavier J.-P.* Estimated location of the seafloor sources of marine natural oil seeps from sea surface outbreaks: A new “source path procedure” applied to the northern Gulf of Mexico // *Mar. Pet. Geol.* 2018. V. 91. P. 190–201.
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.12.035>
- NOAA, 2016. Open water oil identification job aid for aerial observation with standardized oil slick appearance and structure nomenclature and codes. Office of Response and Restoration, Ver. 3. (https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/OWJA_2016.pdf).
- Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. The National Academies Press, Washington, 2003.
- Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E. et al.* Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // *Ocean Science.* 2018. V. 14. № 1. P. 87–103.
<https://doi.org/10.5194/os-14-87-2018>
- Schumacher D.* Pre-drill prediction of hydrocarbon charge: microseepage-based prediction of charge and post-survey drilling results / AAPG International Conference and Exhibition, Oct. 23–26, 2011, Milan, Italy (https://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2011/40841schumacher/ndx_schumacher.pdf.htm).
- Sun S., Hu C., Garcia-Pineda O. et al.* Remote sensing assessment of oil spills near a damaged platform in the Gulf of Mexico // *Mar. Pollut. Bull.* 2018. V. 136. P. 141–151.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.09.004>
- Vasilev A., Tsekov M., Petsinski P. et al.* New possible earthquake precursor and initial area for satellite monitoring // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 8. ID 586283.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.586283>

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

**ИЗМЕНЕНИЕ УРОВНЯ МОРЯ И ГЕОСТРОФИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ
В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ И МОРЕ ЛАПТЕВЫХ
ПОД ВЛИЯНИЕМ ВЕТРА И СТОКА РЕКИ ЛЕНЫ**© 2022 г. А. Г. Андреев^а, *, И. И. Пипко^а^аТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Владивосток, Россия

*E-mail: andreev@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 13.09.2021 г.

Проведен анализ распределения распресненных вод в Восточно-Сибирском море (ВСМ) и море Лаптевых (МЛ) в период наименьшей ледовитости (август–октябрь) с использованием спутниковых данных по уровню моря и STD данных судовых наблюдений. Показано, что наблюдается хорошее согласие между распределением солёности/плотности в поверхностном слое вод и уровнем моря в исследуемом районе. Увеличение (уменьшение) стока реки Лены в период летнего половодья приводит к повышению (снижению) уровня моря в восточной части МЛ и западной и юго-западной частях ВСМ в сентябре и октябре ($r = 0.52–0.59$, 1993–2019 гг.). Усиление ветров западных румбов сопровождается уменьшением солёности и повышением уровня моря в прибрежных областях МЛ и ВСМ. Ветра восточных румбов вызывают снижение уровня моря в южных областях МЛ и ВСМ и перемещение вод с пониженной солёностью из прибрежной в открытую часть моря. Ветра западных/восточных румбов сопровождаются направленными на восток/запад геострофическими течениями в зоне пролива Санникова и в юго-западной части ВСМ.

Ключевые слова: спутниковые данные, уровень моря, геострофические течения, солёность вод, река Лена, Восточно-Сибирское море, море Лаптевых

DOI: 10.31857/S0205961422020026

ВВЕДЕНИЕ

Море Лаптевых (МЛ) и Восточно-Сибирское море (ВСМ) находятся под влиянием стока рек Лены (~500 км³/год), Колымы (~100 км³/год) и Индигирки (~50 км³/год) (<http://gims.unh.edu/>) (рис. 1, а). Приблизительно 90% от годового стока рек приходится на тёплый период года (июнь – сентябрь). Зоны смешения речных и морских вод играют ключевую роль в физических и биогеохимических процессах и во многом определяют функционирование прибрежных экосистем в данных морях (Anderson et al., 2011). Речной сток приводит к значительному снижению концентрации растворённого кислорода и рН в водах МЛ и ВСМ и, как следствие, сопровождается растворением карбонатов (Semiletov et al., 2016).

Воды реки Лены поступают в МЛ, где формируется стоковая линза (сравнительно тонкий слой распресненных вод на поверхности моря). По краям стоковой линзы формируются стоковые фронты и струйные геострофические течения, а под ней – резкие слои скачка солёности, температуры и плотности (Pavlov et al., 1996). Ветра западных румбов благоприятствуют проникновению распресненных вод из МЛ в ВСМ (через проливы Д. Лаптева и Санникова) и их переносу

в восточном направлении вдоль побережья ВСМ (Pavlov et al., 1996; Weingartner et al., 1999; Dmitrienko et al., 2008; Osadchiev et al., 2020a).

Ранее было проведено исследование структурных особенностей зоны смешения речных и морских вод в ВСМ и МЛ с использованием спутниковых изображений в видимом и инфракрасном диапазоне спектра и экспедиционных данных (Dmitrienko et al., 2005, 2008; Osadchiev et al., 2020a, 2020b). В работе (Dmitrienko et al., 2005) было показано, что циклональная (антициклональная) атмосферная циркуляция над восточной Арктикой и ветра западных (восточных) румбов вдоль побережья приводят к понижению (повышению) солёности в ВСМ и повышению (понижению) солёности в МЛ севернее дельты реки Лена. При антициклональной (циклональной) атмосферной циркуляции значительная часть вод, подверженных влиянию реки Лена, переносится на северо-восток в район глубоководной котловины (на восток в зону ВСМ) (Dmitrienko et al., 2008). Ветра западных румбов (прижимные) ветра увеличивают солёность в прибрежной части МЛ. Ветра восточных румбов (благоприятные для прибрежного апвеллинга) повышают солёность поверхностных вод в при-

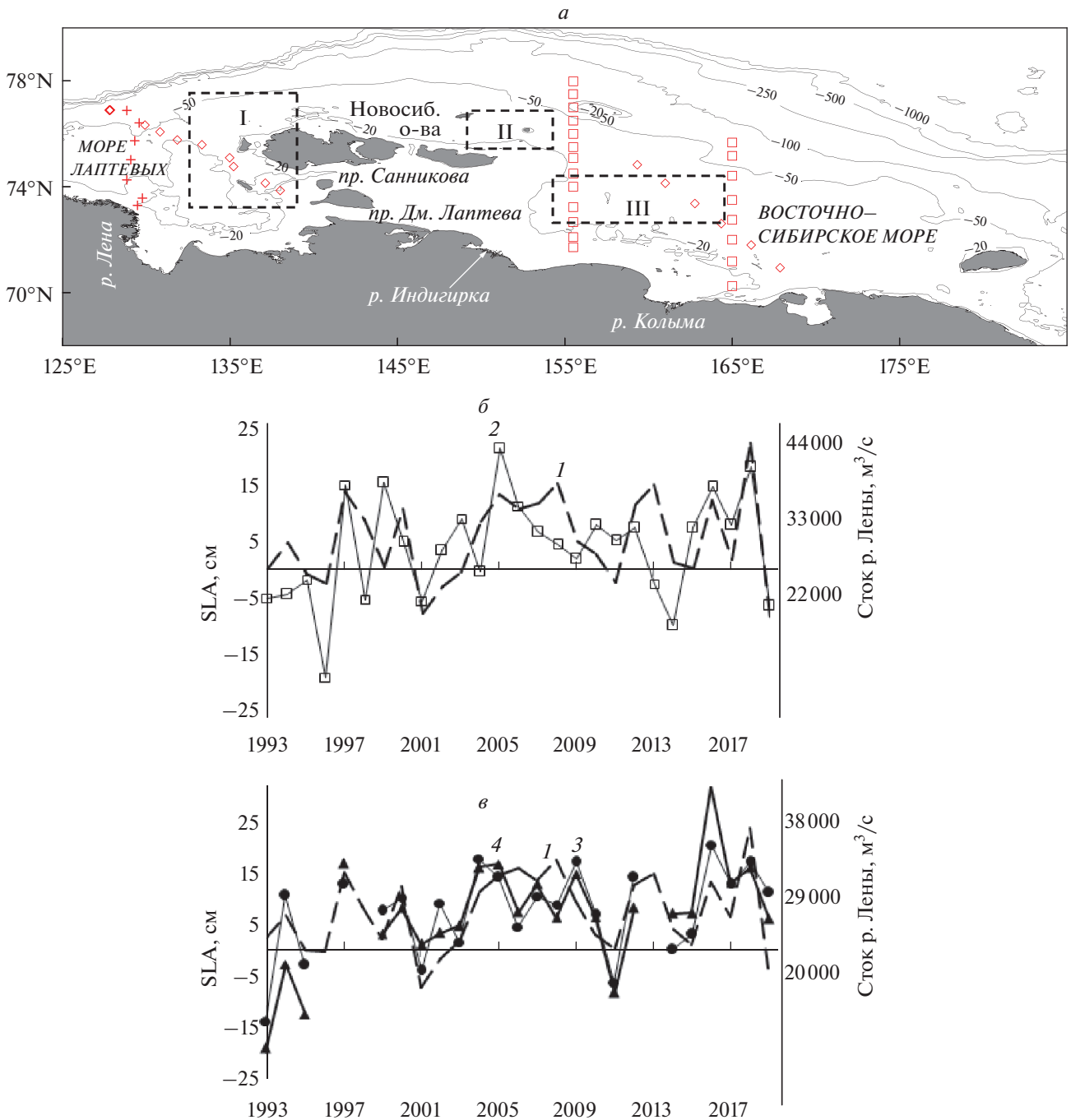


Рис. 1. *a* – карта исследуемого района и положение гидрологических станций (+ – 24–26 сентября 2011 г., ◇ – 28–30 сентября и 13–14 октября 2016 г., □ – 26 сентября– октября 2019 г.). I–IV – зоны, где исследовалась связь между изменением аномалии уровня моря (SLA) и стоком реки Лены; *б* – межгодовая изменчивость расхода реки Лены (осредненного с июля по сентябрь) и SLA в МЛ (зона I); *в* – межгодовая изменчивость расхода реки Лены (осредненного с июля по октябрь) и SLA в ВСМ (зоны II–III): 1 – расход реки Лены; 2, 3 и 4 – SLA в зонах I, II и III.

брежной части и снижают соленость мористее. Результаты исследования ветрового апвеллинга в прибрежных зонах ВСМ и МЛ с использованием спутниковых снимков в видимом и инфракрасном диапазонах спектра (температура и мутность вод) представлены в работе (Osadchiev et al., 2020б). Авторами отмечено, что прибрежный ап-

веллинг способствует смешению вод рек Лены (МЛ), Колымы и Индигирки (ВСМ) с морскими водами шельфа восточной Арктики, что приводит к снижению стратификации вод.

Идентификация распресненных вод в зоне восточной Арктики, используя данные дистанци-

онных измерений в видимом и инфракрасном диапазоне спектра (концентрация взвеси и температура поверхностных вод) ограничена в связи наличием облачности и эрозией береговой линии (Osadchiev et al., 2020a). Согласно результатам исследований, представленных в работах (Semiletov et al., 2011, Чаркин и др., 2015), вклад эрозии берегов в содержание взвешенного вещества в прибрежной зоне ВСМ и МЛ может превышать вклад от речного стока. Температура поверхностных вод в летний период не превышает 10°C, что ограничивает использование спутниковых данных по солености вод (Meissner et al., 2016).

В данной работе показано, что для идентификации распресненных вод в ВСМ и МЛ может быть использована спутниковая информация по уровню моря. Ранее данный подход использовался при исследовании пространственной изменчивости распределения вод реки Амур в Сахалинском заливе и прилегающих районах Охотского моря (Андреев, 2020). Показано влияние ветра и стока реки Лена на пространственно-временную изменчивость уровня моря и геострофических течений в ВСМ и МЛ в период наименьшей ледовитости вод (август–октябрь).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наши исследования основываются на спутниковой информации по уровню моря (SSH), аномалии уровня моря (SLA) и скорости геострофических течений с пространственным разрешением 0.25 на 0.25 град (для исследуемого района: ~30 км по долготе и ~12 км по широте) и временным разрешением 1 день (база данных “Коперникус”, <http://marine.copernicus.eu>) с 1993 по 2019 г. Объединенный массив “Коперникус” включает в себя скорректированные альтиметрические данные, полученные со спутников Cryosat-2, Jason-1, Jason-2, Envisat, TOPEX/Poseidon, GFO-1, ERS-1 и ERS-2. Для коррекции альтиметрических данных применяется глобальная приливная модель. Поправки на изменения уровня моря, вызванные изменением атмосферного давления, рассчитываются по уравнению обратного барометра. При расчете геострофических течений используется средняя динамическая топография океана MDT CNES-CLS-09. Величина ошибки спутниковых данных по уровню моря (SSH) составляет 1–2 см на расстоянии, превышающем 20 км от берега (Ablain et al., 2015). При анализе пространственно – временной изменчивости температуры поверхностных вод (SST) использованы спутниковые снимки с пространственным разрешением 1 км, полученные с сайта GHRSSST (Group for High Resolution Sea Surface Temperature) (PO.DAAC – GHRSSST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis). Данные GHRSSST основываются на спутниковых данных, полученных с микроволнового сканирующего радиометра EOS

(AMSR-E), микроволнового радиометра WindSat и спектрорадиометра MODIS Aqua/Terra.

В работе использовались CTD данные экспедиций НИС “Академик Лаврентьев” (сентябрь 2011 г. и сентябрь–октябрь 2016 г.) и НИС “Профессор Мультановский” (сентябрь–октябрь 2019 г.) Для анализа фоновых гидрометеорологических условий привлекались данные о стоке р. Лены (Arctic GRO Discharge Dataset) (Shiklomanov et al., 2021) и скоростям и направлению ветра (средне-суточные данные) (Центр диагностики климата, <http://www.esrl.noaa.gov>).

СВЯЗЬ УРОВНЯ МОРЯ С СОЛЕННОСТЬЮ/ПЛОТНОСТЬЮ ВОД

Наши результаты указывают на влияние водности реки Лены в период летнего половодья на временную изменчивость уровня моря в МЛ и ВСМ. Повышение (понижение) водности реки Лены сопровождалось увеличением (снижением) уровня моря ($r = 0.52–0.59$, 1993–2019 гг.) в восточной части МЛ в сентябре и западной и юго-западной частях ВСМ в октябре (рис. 1, *в*, 1, *г*), что являлось следствием увеличения (уменьшения) притока вод с пониженной соленостью и повышенными величинами уровня моря. Увеличение расхода вод реки Лены в два раза с 22000 до 44000 м³/с (среднее с июля по сентябрь) вызывало увеличение уровня моря в восточной части МЛ в сентябре приблизительно на 25 см. Для западной части ВСМ повышение расхода реки Лены с 20000 до 38000 м³/с (среднее с июля по октябрь) приводило к увеличению уровня моря приблизительно на 15 см в октябре.

На рис. 2, *а–г* представлено распределение SSH, солености и плотности вод (осредненной для слоя 0–20 м) на разрезах в МЛ и ВСМ (рис. 1, *а*). Исключая зоны вблизи берега, наблюдалось хорошее согласие между распределением SSH и солености/плотности вод. В зонах с пониженной (повышенной) соленостью/плотностью в верхнем 20 м слое вод наблюдались низкие (высокие) величины SSH. Для прибрежных вод расхождение между распределением SSH и соленостью/плотностью вод может быть обусловлено вызываемыми ветром сгонно – нагонными явлениями и ошибкой спутниковых данных вблизи берега.

Летом 2011 г. расход реки Лены был незначителен (32000 м³/с, среднее с июня по сентябрь). В августе и в первой декаде сентября над южной и центральной областями МЛ преобладали ветра восточных румбов, которые вызвали смещение вод с пониженной соленостью и SSH от устья реки Лены в открытую часть МЛ (75–77° с.ш., рис. 2, *а*).

В конце сентября мезомасштабный антициклональный круговорот вод с центром расположенным вблизи точки с координатами 75.5° с.ш., 129° в.д. обеспечивал приток вод (с повышенной

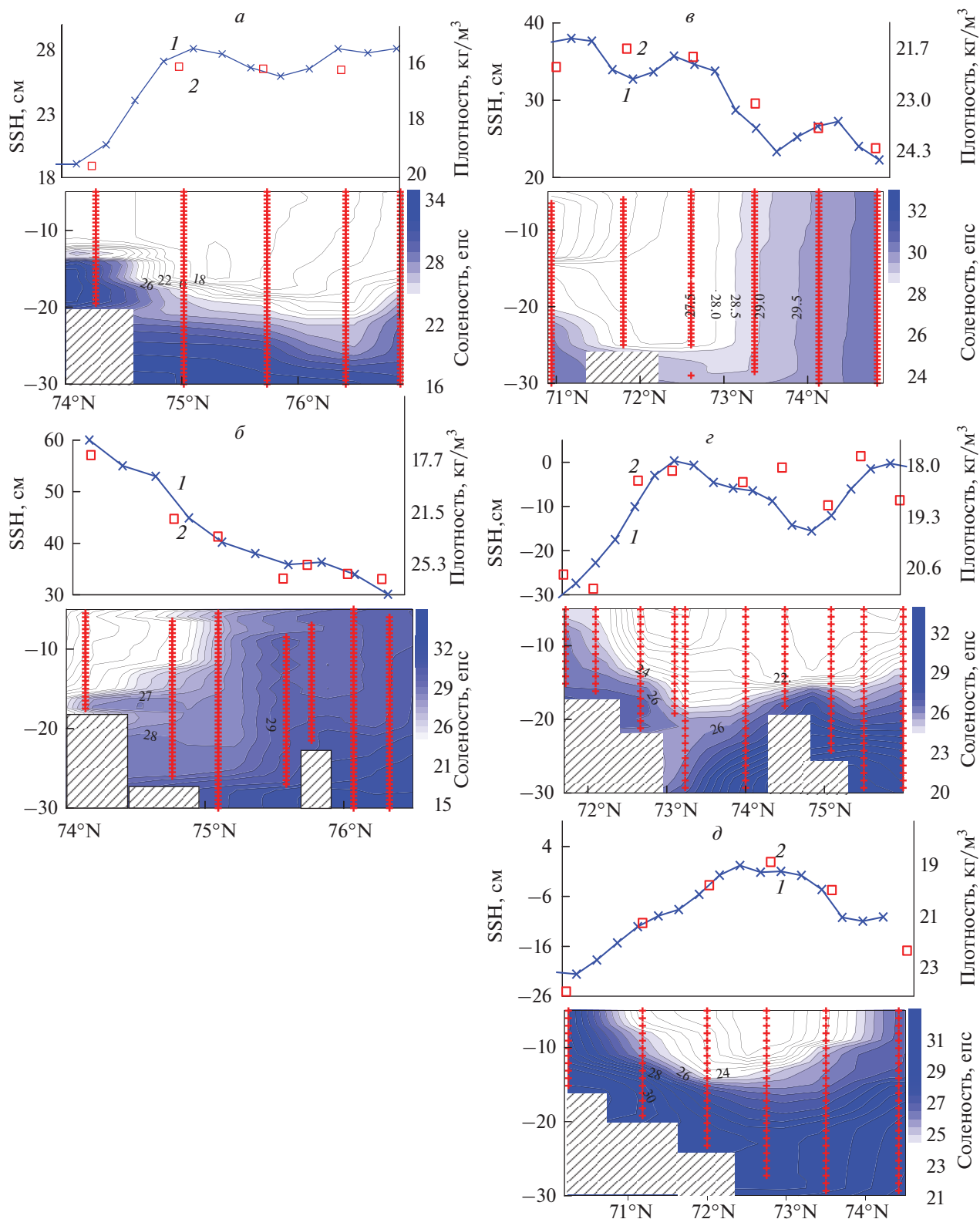


Рис. 2. Распределение уровня моря (SSH), плотности (осредненной в слое 0–20 м) и солёности вод на разрезах в МЛ и ВСМ: *a* – МЛ (129° E), 24–26 сентября 2011 г.; *б* – МЛ (74° N, 137° E–76.4° N, 130° E), 28–30 сентября 2016 г.; *в* – ВСМ (71° N, 168° E–75° N, 159° E), 13–14 октября 2016 г.; *з* – ВСМ (155° E), 25–28 сентября 2019 г.; *д* – ВСМ (165° E), 29 сентября–1 октября 2019 г. 1 – SSH, 2 – плотность вод.

соленостью и плотностью) из зоны материкового склона в прибрежную часть МЛ вдоль 131° в.д. Различие в плотности вод ($\Delta\rho = 4 \text{ кг/м}^3$) в слое 0–20 м (z) привело к различию в SSH между прибрежной и открытой частями МЛ ($\Delta\text{SSH} = \Delta\rho/\rho z = 8 \text{ см}$) в период с 24 по 26 сентября 2011 г. (рис. 2, а).

Летом 2016 г. расход реки Лены был повышен (47000 м³/с, среднее с июня по сентябрь). В августе и сентябре над МЛ и ВСМ преобладали северо-западные и западные ветра (“прижимные” ветра) с зональными скоростями 5–14 м/с. Это увеличило объем распресненных вод и привело к концентрированию вод с пониженной соленостью и плотностью в прибрежных зонах МЛ и ВСМ (рис. 2, б, 2, в). Перепады в SSH между прибрежной и открытой частями морей достигали 16–24 см. Распределение солености и SSH на разрезах показывает, что северо-западные и западные ветра вызвали заток вод с повышенной соленостью ($\geq 29 \text{ е. п. с.}$) и SSH из зоны материкового склона на шельф МЛ и ВСМ (73–75° с.ш., рис. 2, б, 2, в). Появление ветров восточных румбов, благоприятных для прибрежного апвеллинга, в первой половине октября привело к подъему изогалин в придонном слое вод вблизи побережья в ВСМ (13–14 октября 2016 г., рис. 2, в) и снижению разности в SSH между прибрежной и открытой частями моря.

В 2019 г. расход реки Лены был минимальным за период с 1993 по 2019 г. (31000 м³/с, среднее с июня по сентябрь). Западные ветра во 2-ой и 3-ей декадах сентября вызвали прибрежный апвеллинг и смещение вод с пониженной соленостью и плотностью из прибрежной в открытую часть ВСМ (рис. 2, д, 2, е). Перепад в SSH между данными областями ВСМ превышал 20 см. Ветровой апвеллинг вызвал подъем вод с повышенной соленостью и сгущение изогалин над подводной возвышенностью в западной части ВСМ (74–75° с.ш., рис. 2, д), что понизило SSH на 10–15 см в зоне подводной возвышенности.

ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА УРОВЕНЬ МОРЯ И ГЕОСТРОФИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ

В период с начала августа по конец октября значительное влияние на пространственно-временную изменчивость уровня моря в исследуемом регионе оказывал ветровой режим. На рис. 3, а показано распределение коэффициента корреляции между SSH (среднесуточные данные, 1 августа–20 октября) и зональной скоростью ветра (72.5–75° N, 130–170° E; сглаженной 7-дневным скользящим средним, со сдвигом 3.5 дня) для августа–октября 2015 г. Смена направления ветра с восточного на западное с периодичностью приблизительно 15 дней повышало SSH в восточной части МЛ и западной и юго-западной областях ВСМ. Амплитуда изменений SSH в юго-западной

части ВСМ достигала 75 см (рис. 3, з). Коэффициент корреляции между зональной скоростью ветра и SSH для августа–октября 2013 г., августа–октября 2015 г. и августа–октября 2019 г. был равен 0.80–0.86 (рис. 3, б, 3, з, 3, д). Для августа–октября 2016 г. ветра восточных/западных румбов (отрицательные/положительные величины зонального ветра) приводили к повышению/снижению SSH на приблизительно 6 см (рис. 3, в) на границе шельфа и материкового склона в ВСМ (рис. 3, а) ($r = -0.82$, 1 августа–20 октября). Это было связано с поступлением в данную зону вод шельфа/материкового склона с пониженной/повышенной соленостью и плотностью вод (рис. 2, б, 2, в).

Изменение уровня моря оказывало влияние на направление и скорости геострофических течений (определяемые горизонтальными градиентами SSH) в исследуемом регионе. Смена направления ветра с восточного на западное сопровождалось сменой направления геострофических течений в ВСМ. Наибольшие временные изменения скорости геострофических течений наблюдались в областях со значительными перепадами уровня моря (юго-западная и западная части ВСМ, зона пролива Санникова). Для данных областей коэффициент корреляции между зональной скоростью ветра (сглаженной 7-дневным скользящим средним, со сдвигом 3.5 дня) и зональной скоростью геострофических течений (среднесуточные данные, 1 августа–20 октября) был равен 0.81–0.94 (рис. 4).

В августе и сентябре 2013 г. (рис. 4, а) и в августе и сентябре 2019 г. (рис. 4, з) в юго-западной части ВСМ и в зоне пролива Санникова преобладал западный перенос вод (скорости геострофических течений – 5–20 см/с). Воды из ВСМ поступали в МЛ. Смена направления ветра с восточного на западное в начале октября (2013.78–2013.84, 2019.78–2019.84) изменило направление переноса вод с западного на восточное (рис. 4, а, 4, з). В августе и сентябре 2016 г. (рис. 4, в) ветра западных румбов способствовали переносу вод (скорости геострофических течений – 5–25 см/с) в восточном направлении в зоне пролива Санникова и юго-западной части ВСМ. Воды из МЛ поступали в ВСМ.

В августе–октябре 2015 г. наблюдалось изменение направления ветра и геострофических течений в юго-западной части ВСМ и в зоне пролива Санникова с периодичностью приблизительно 15 дней (рис. 4, б). За данный период зональная скорость геострофических течений в юго-западной части ВСМ изменялась на 50 см/с (от –25 до 25 см/с).

На рис. 5 показано распределение SSH, SST и поля геострофических течений в МЛ и ВСМ для 28 сентября 2015 г. и 24 сентября 2019 г. В период с 16 по 28 сентября 2015 г. (с 4 по 24 сентября 2019 г.) над МЛ и ВСМ преобладали западные (восточные) ветра с зональными скоростями 3–12 м/с

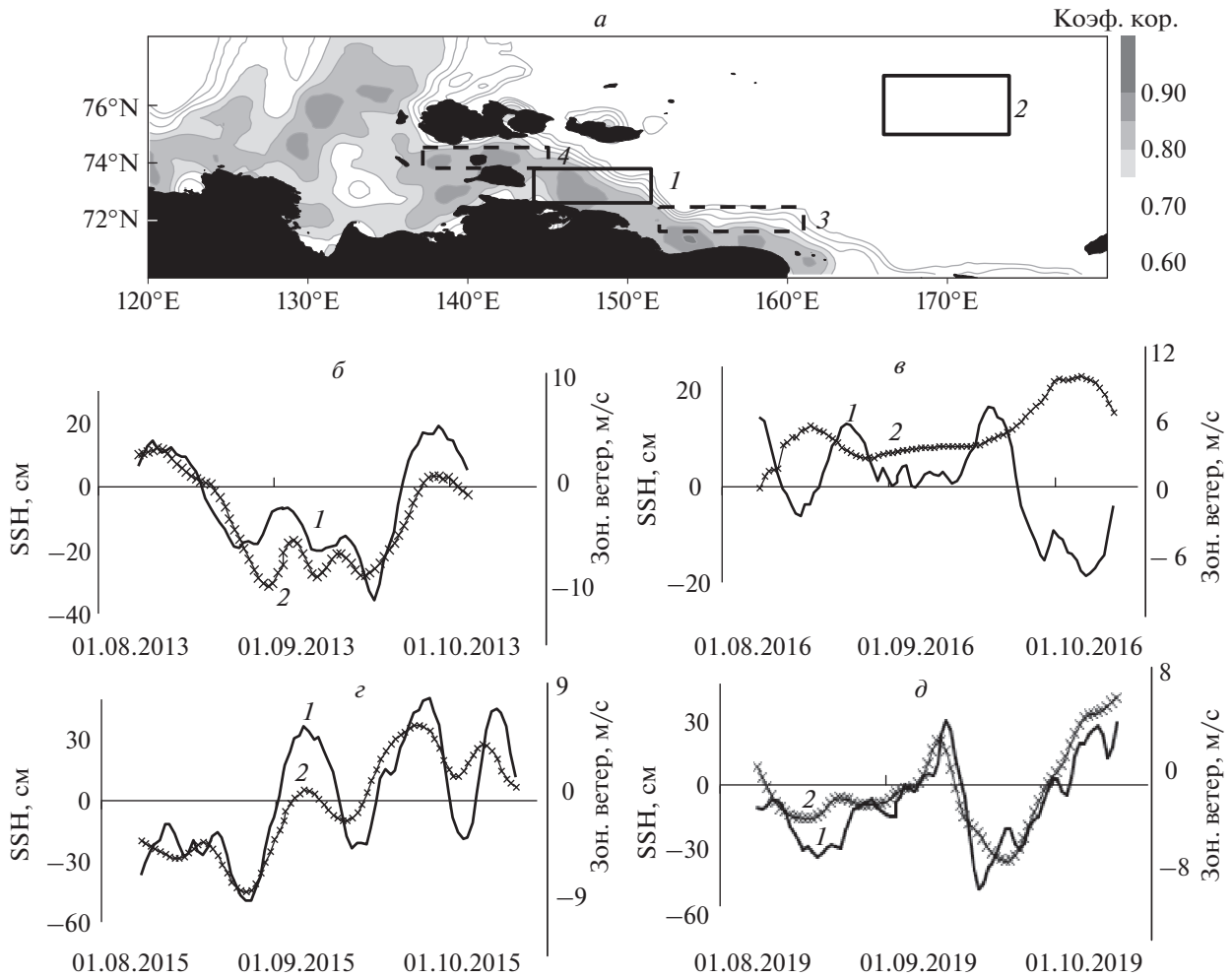


Рис. 3. *a* – распределение коэффициента корреляции между скоростью зонального ветра (72.5–75° N, 130–170° E; сглаженной 7-дневным скользящим средним, со сдвигом 3.5 дня) и SSH (среднесуточные данные, 1 августа–20 октября 2015 г.); *б–д* – временная изменчивость SSH в областях 1 (*б, г, д*) и 2 (*в*) ВСМ (рис. 3, *a*) и скорости зонального ветра: 1 – скорость ветра, 2 – SSH. Сплошной и пунктирной линиями на рис. 3, *a* выделены области, где исследовалась временная изменчивость SSH (1, 2) и скорости геострофических течений (3, 4).

(4–8 м/с). Осредненный за период с июня по сентябрь расход реки Лены в 2015 г. (41000 м³/с) был выше приблизительно на 30%, чем в 2019 г. (31000 м³/с). В конце сентября 2015 г. зоны с высокими величинами SSH (50–60 см) наблюдались вблизи побережья материка (рис. 5, *a*). Западнее и севернее Новосибирских островов выделялись мезомасштабные антициклональные круговороты вод (горизонтальный размер 50 км) с повышенными величинами SSH (40–45 см) в центре круговоротов. Основной поток вод в южных областях МЛ и ВСМ был направлен на запад. На западной границе ВСМ выделялся, направленный на юг, поток вод со скоростями геострофических течений 40–60 см/с. Для августа–октября 2015 г. западные ветры приводили к повышенным величинам SSH в зоне между Новосибирскими островами и материком (положительные величины коэффициента корреляции между зональным ветром и SSH)

(рис. 3, *a*). Это сопровождалось зональным градиентом SSH и направленным на юг потоком вод в западной части ВСМ (рис. 5, *a*). В сентябре 2015 г. поступление вод из МЛ в ВСМ происходило не только через проливы Д. Лаптева и Санникова, но и вдоль северного побережья Новосибирских островов. Распределение SSH и поле геострофических течений для сентября 2015 г. (рис. 5, *a*) указывает на влияние мезомасштабных антициклонических круговоротов вод (западнее и севернее Новосибирских островов) на водообмен между МЛ и ВСМ.

В 2-ой половине сентября 2019 г. благоприятные для прибрежного апвеллинга восточные ветры вызвали значительно понижение SSH до –(45–60) см в южной части МЛ и ВСМ (рис. 5, *б*). Из-за значительной разности в SSH между прибрежными водами и водами открытой части моря, основной поток вод был направлен из ВСМ в

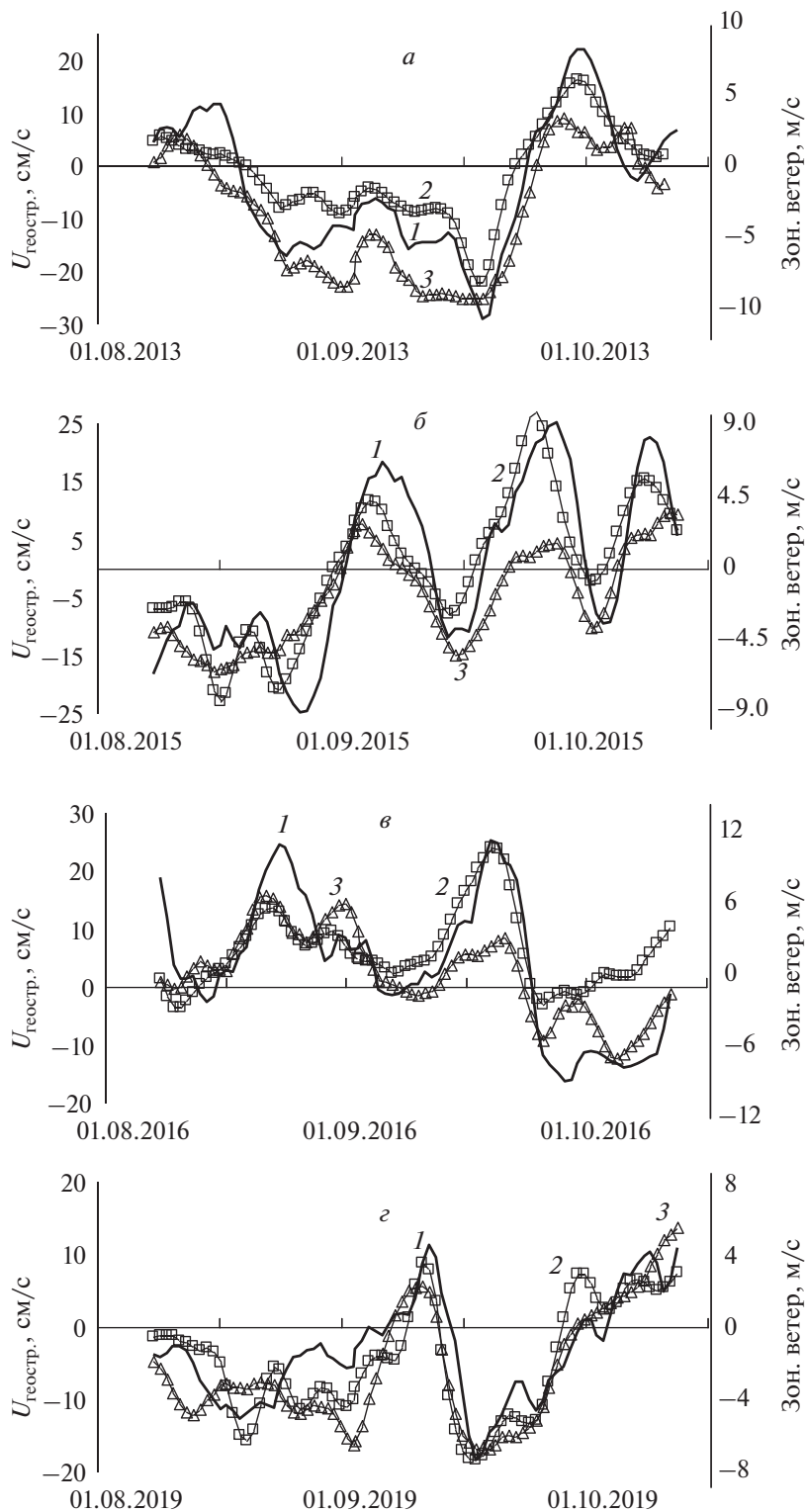


Рис. 4. *a–г* – временная изменчивость зональной скорости геострофических течений в областях 3 и 4 (рис. 3, *a*) и скорости зонального ветра: 1 – скорость ветра, 2 – скорость течений в юго-восточной части ВСМ (область 3), 3 – скорость течений в зоне пролива Санникова (область 4).

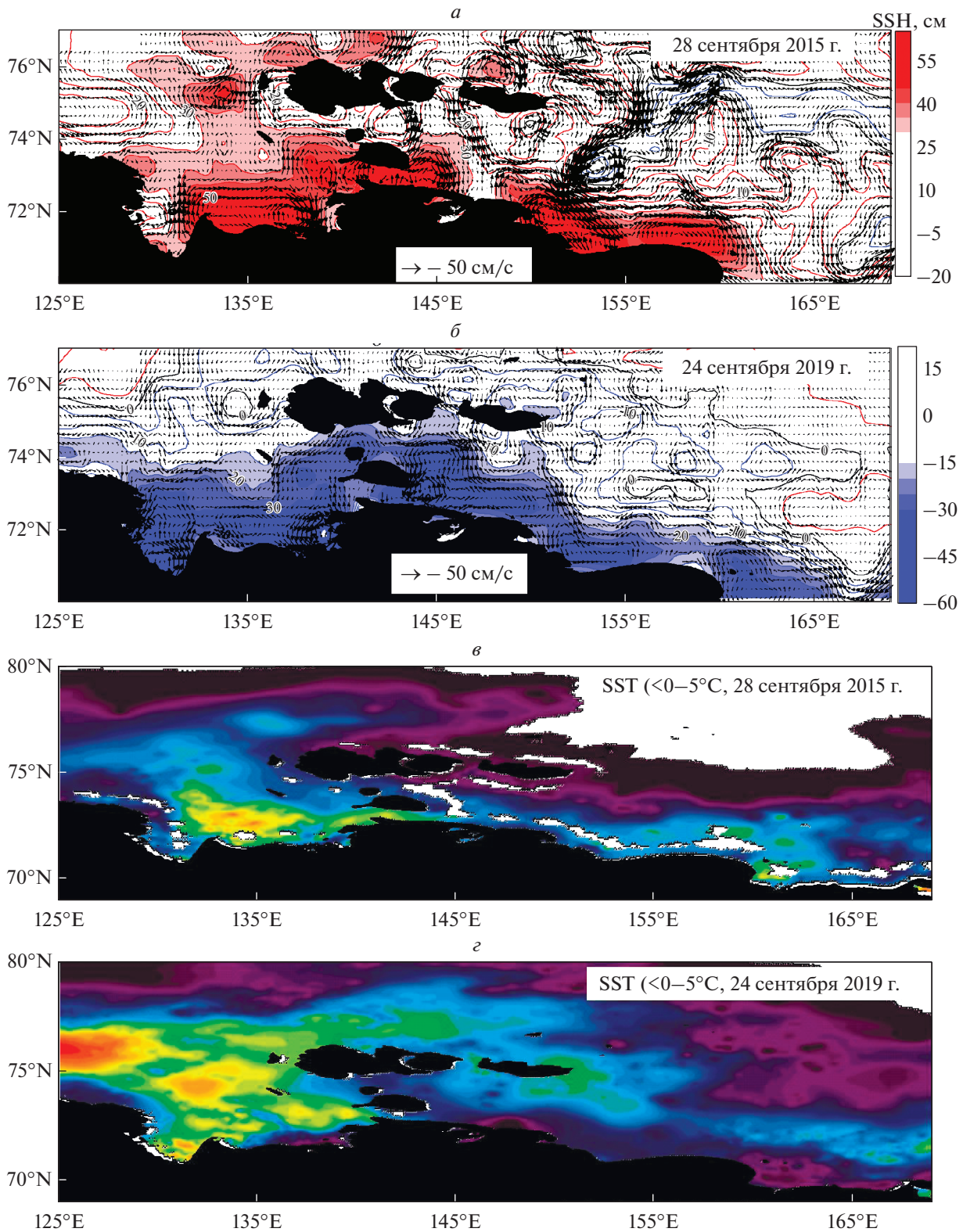


Рис. 5. *a–б* – распределения уровня моря и поля поверхностных геострофических течений; *в–г* – распределение SST ($<0^{\circ}$ – 5° C) в МЛ и ВСМ 28 сентября 2015 г. и 24 сентября 2019 г. Холодным водам соответствует синий цвет, теплым водам – красный.

МЛ через пролив Санникова. Скорости геострофических течений в южной части ВСМ достигали 30 см/с.

Речные воды, поступающие в сектор восточной Арктики в теплое время года, характеризуются повышенными температурами по сравнению с водами Арктики. Контрасты температуры на границах стоковой линзы реки позволяют использовать спутниковые наблюдения SST для исследования закономерностей распространения вод, подверженных речному стоку, в МЛ и ВСМ. Для сентября 2015 г. наблюдалось согласие между распределением SSH и SST в МЛ и ВСМ. Воды, подверженные влиянию речного стока, характеризовались повышенными величинами SSH и SST равными 2–5°C (южная и восточные части МЛ и южная часть ВСМ) (рис. 5, а, 5, в). Западнее и севернее Новосибирских островов температурные контрасты на границах вод стоковой линзы значительно уменьшались, что могло быть следствием вертикального и горизонтального перемешивания с водами внешнего шельфа, характеризующимися отрицательными температурами. В сентябре 2019 г. прибрежный апвеллинг вызвал снижение SSH и SST в южной части ВСМ. Воды с пониженной соленостью, повышенными значениями SST и SSH переместились из прибрежной в открытую часть ВСМ (рис. 2, з, 2, д, рис. 5, б, 5, г). В МЛ к востоку и юго-востоку от устья реки Лены не наблюдалось понижение SST в прибрежных водах (рис. 5, г). Возможно, повышенная соленостная/плотностная стратификация вод в данной области МЛ препятствовала поступлению подповерхностных вод с низкими температурами на поверхность моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовалось распределение распресненных вод в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море в период наименьшей ледовитости (август–октябрь) с использованием спутниковых данных по уровню моря и STD данных судовых наблюдений. Наблюдается хорошее согласие между распределением солености в верхнем 20 м слое вод и уровнем морем в исследуемом регионе. Увеличение стока реки Лены в период летнего половодья приводит к повышению уровня моря в восточной части моря Лаптевых и западной и юго-западной частях Восточно-Сибирского моря, вследствие поступления вод с пониженной соленостью и повышенными величинами уровня моря. Усиление ветров западных румбов сопровождается уменьшением солености и повышением уровня моря в южных областях моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. Западные ветра вызывают поступление вод с повышенной соленостью из зоны материкового склона на шельф, что понижает уровень на внешней границе материкового шельфа. Ветра восточных румбов вызывают снижение

уровня в южных областях моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря и перемещение вод с пониженной соленостью из прибрежной в открытую часть моря. Ветра западных/восточных румбов сопровождаются направленными на восток/запад геострофическими течениями в зоне пролива Санникова и в юго-западной части Восточно-Сибирского моря. Спутниковые данные демонстрируют, что мезомасштабные (диаметр 50 км) антициклональные круговороты вод, наблюдаемые вблизи западного и северного побережья Новосибирских островов, оказывают влияние на водообмен между морем Лаптевых в Восточно-Сибирским морем.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-17-00027).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны руководству ДВНИГМИ за возможность опубликования STD данные экспедиции “Профессор Мультиановский”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев А.Г. Распределение распресненных вод Амурского лимана в Охотском море по данным спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 2. С. 89–96.
- Чаркин А.Н., Дударев О.В., Шахова Н.Е. и др. Особенности формирования полей взвеси в морях восточной Арктики // ДАН. 2015. Т. 462. № 5. С. 595–600.
- Ablain M., Cazenave A., Larnicol G. et al. Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project // Ocean Sci. 2015. V. 11. P. 67–82.
- Anderson L.G., Björk G., Jutterström S. et al. East Siberian Sea, an Arctic region of very high biogeochemical activity // Biogeosciences. 2011. V. 8. P. 1745–1754.
- Dmitrenko I., Kirillov S., Eicken H., Markova N. Wind-driven summer surface hydrography of the eastern Siberian shelf // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L14613. <https://doi.org/10.1029/2005GL023022>
- Dmitrenko I., Kirillov S., Tremblay L.B. The long-term and interannual variability of summer fresh water storage over the eastern Siberian shelf: Implication for climatic change // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. <https://doi.org/10.1029/2007JC004304>
- Meissner T., Wentz F.J., Scott J., Vazquez-Cuervo J. Sensitivity of ocean surface salinity measurements from spaceborne L-band radiometers to ancillary sea surface temperature // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 2016. V. 54. № 12. P. 7105–7110.
- Osadchiv A.A., Pisareva M.N., Spivak E.A., Shchuka S.A., Semiletov I.P. Freshwater transport between the Kara, Laptev, and East – Siberian seas // Nature Scientific Reports. 2020. 10:13041.
- Osadchiv A.A., Silvestrova K., Myslenkov S. Wind-driven coastal upwelling near large river deltas in the Laptev and East-Siberian Seas // Remote Sens. 2020. V. 12. 844. <https://doi.org/10.3390/rs12050844>

Pavlov V.K., Timokhov L.A., Baskakov G.A. et al. Hydrometeorological regime of the Kara, Laptev, and East-Siberian Seas // *Tech. Memo. APL-UW TM 1-96*. 1996. 179 p.

Semiletov I., Pipko I., Gustafsson O. et al. Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon // *Nat. Geosci.* 2016. V. 9. 361. <https://doi.org/10.1038/ngeo2695>

Semiletov I.P., Pipko I.I., Shakhova N.E. et al. Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic

Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion // *Biogeoscience*. 2011. V. 8. P. 2407–2426.

Shiklomanov A.I., Holmes R.M., McClelland J.W. et al. 2021. Arctic Great Rivers Observatory. Discharge Dataset. <https://www.arcticrivers.org/data>.

Weingartner T.J., Danielson S., Sasaki Y. et al. The Siberian Coastal Current: A wind and buoyancy forced coastal current // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 29697–29713.

Changes in Sea Level and Geostrophic Currents in the East Siberian Sea and the Laptev Sea under the Influence of Wind and Runoff of the Lena River

A. G. Andreev¹ and I. I. Pipko¹

¹*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia*

The analysis of the distribution of freshened waters during the period of least ice coverage (August–October) in the East Siberian Sea (ESS) and the Laptev Sea (LS) using satellite data on sea level and CTD data from ship observations. It is shown that there is good agreement between the distribution of salinity/density in the surface layer and the sea level in the study area. An increase (decrease) in the runoff of the Lena River during the summer flood leads to an increase (decrease) in sea level anomaly in the eastern part of the LS and the western and southwestern parts of the ESS in September and October ($r = 0.52–0.59$, 1993–2019 rr.). Strengthening of the western winds increases the inflow of waters with low salinity (increased sea level) from the ML to the ESS. The eastern winds cause a decrease in the level near the coast and the advection of waters with low salinity from the coastal to the open sea. The western/eastern winds are accompanied by geostrophic currents directed to the east/west in the Sannikov Strait zone and in the southern part of the ESS.

Keywords: satellite data, sea level, geostrophic currents, water salinity, Lena River, East Siberian Sea, Laptev Sea

REFERENCES

Ablain M., Cazenave A., Larnicol G. et al. Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project // *Ocean Sci.* 2015. V. 11. P. 67–82.

Anderson L.G., Björk G., Jutterström S. et al. East Siberian Sea, an Arctic region of very high biogeochemical activity // *Biogeosciences*. 2011. V. 8. P. 1745–1754.

Andreev A.G. The Distribution of the Desalinated Waters of the Amur Estuary in the Okhotsk Sea According to Satellite Observations // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. V. 55. № 9. P. 1160–1165.

Charkin A.N., Dudarev O.V., Shakhova N.E. u др. The formation of suspended particulate matter fields in the eastern Arctic seas // *Doklady Earth Sciences*. 2015. V. 462. № 2. P. 626–630.

Dmitrenko I., Kirillov S., Eicken H., Markova N. Wind-driven summer surface hydrography of the eastern Siberian shelf // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L14613. <https://doi.org/10.1029/2005GL023022>

Dmitrenko I., Kirillov S., Tremblay L.B. The long-term and interannual variability of summer fresh water storage over the eastern Siberian shelf: Implication for climatic change // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. <https://doi.org/10.1029/2007JC004304>

Meissner T., Wentz F.J., Scott J., Vazquez-Cuervo J. Sensitivity of ocean surface salinity measurements from spaceborne L-band radiometers to ancillary sea surface temperature //

IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 2016. V. 54. № 12. P. 7105–7110.

Osadchiv A.A., Pisareva M.N., Spivak E.A., Shchuka S.A., Semiletov I.P. Freshwater transport between the Kara, Laptev, and East – Siberian seas // *Nature Scientific Reports*. 2020. 10:13041.

Osadchiv A.A., Silvestrova K., Myslenkov S. Wind-driven coastal upwelling near large river deltas in the Laptev and East-Siberian Seas // *Remote Sens.* 2020. V. 12. 844. <https://doi.org/10.3390/rs1205084>

Pavlov V.K., Timokhov L.A., Baskakov G.A. et al. Hydrometeorological regime of the Kara, Laptev, and East-Siberian Seas // *Tech. Memo. APL-UW TM 1-96*. 1996. 179 p.

Semiletov I., Pipko I., Gustafsson O. et al. Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon // *Nat. Geosci.* 2016. V. 9. 361. doi: 10.1038/ngeo2695.

Semiletov I.P., Pipko I.I., Shakhova N.E. et al. Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion // *Biogeoscience*. 2011. V. 8. P. 2407–2426.

Shiklomanov A.I., Holmes R.M., McClelland J.W. et al. 2021. Arctic Great Rivers Observatory. Discharge Dataset. <https://www.arcticrivers.org/data>.

Weingartner T.J., Danielson S., Sasaki Y., et al. The Siberian Coastal Current: A wind and buoyancy forced coastal current // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 29697–29713.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛОЩАДИ И ФОРМЫ БЕНГЕЛЬСКОГО
АПВЕЛЛИНГА В 1985–2017 ГГ. И ЕЕ СВЯЗЬ С ДИНАМИЧЕСКИМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ**© 2022 г. В. А. Павлушин^а, *, А. А. Кубряков^а^аМорской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*E-mail: pavlushin.92@mail.ru

Поступила в редакцию 18.06.2021 г.

В работе исследована сезонная и межгодовая изменчивость морфометрических характеристик Бенгельского апвеллинга – формы, площади и протяженности на основе спутниковых измерений температуры поверхности океана (ТПО) за 1985–2016 гг. Северная часть Бенгельского апвеллинга (СБА) (18–26° S) характеризуется увеличением площади в период с января по июль и минимумом в августе–декабре. В наиболее северной части апвеллинга (18–21° S) наибольшая площадь отмечается в апреле–августе, а в январе–феврале и октябре–ноябре принимает минимальные значения. Такие изменения связаны с интенсификацией южного Ангольского течения, которое происходит в феврале и октябре, влияние которого прослеживается до 24° S. Максимум в Южной части (28–32° S) Бенгельского апвеллинга (ЮБА) наблюдается на 1–2 мес. позже в мае–июне, а в сентябре–ноябре ЮБА практически исчезает. В осенние месяцы струя северного течения Агульяс прижимается к берегу Африки, способствуя резкому уменьшению площади ЮБА. На межгодовых масштабах отмечается выраженная изменчивость площади апвеллинга и времени наступления ее пика. При этом после 2010 г. наблюдается тенденция к более раннему наступлению апвеллинга. В самой северной части исследуемого района на широтах 19–22° ю.ш. высокие значения ширины апвеллинга (150 км) отмечались до 2000 г. Далее происходит их резкое падение, и средняя ширина уменьшается практически в 3 раза до величин 50 км. В то же время на широтах 23–28° ю.ш. произошло резкое увеличение площади на ту же величину – около 100 км. Таким образом, несмотря на то, что суммарная площадь апвеллинга осталась постоянной, произошло резкое изменение формы апвеллинга. Ослабление и уменьшение апвеллинга в его самой северной части вероятно вызвано многолетним усилением Ангольского течения, которое наблюдается по альтиметрическим данным.

Ключевые слова: Бенгельский апвеллинг, площадь апвеллинга, Ангольское течение, сезонная и межгодовая изменчивость, температура поверхности океана, спутниковые измерения, течения

DOI: 10.31857/S0205961422020075

ВВЕДЕНИЕ

Восточные пограничные апвеллинги являются частью глобального океанического конвейера, оказывая значительное влияние на вертикальный обмен в Мировом океане. Зоны подъема вод являются важнейшими источниками питательных веществ, способствующих развитию фито- и зоопланктона, которые в свою очередь являются кормовой базой для множества видов рыб. Знание многолетних тенденций в изменениях параметров апвеллинга важно, как для оценки изменчивости морских экосистем и перспектив рыболовства, так и для изучения глобальных и региональных климатических изменений.

Одной из наиболее протяженных апвеллинговых зон является зона Бенгельского апвеллинга (БА) вдоль юго-западного побережья Африки между 34° и 15° ю.ш.. В районе Китового хребта

апвеллинг достигает максимальной продуктивности, что связано с динамикой БА, которая во многом определяет подъем к поверхности антарктической промежуточной воды. По сравнению с другими восточными апвеллингами, БА, обладает уникальными особенностями: он ограничен как с севера, так и с юга двумя теплыми течениями – Ангольским и Агульясским, соответственно, которые могут оказывать большое влияние на характеристики апвеллинга (Backeberg et al., 2012; Strub et al., 1998). По некоторым оценкам вертикальная скорость в зоне БА превышает 2.5×10^{-3} см/с (Полонский, Серебренников, 2019). Такие высокие значения вертикальных скоростей не только определяют особенности функционирования региональных экосистем, но и существенно влияют на характеристики взаимодействия океана с атмосферой, а, следовательно, и климат из-за значительного понижения ТПО в

зоне крупномасштабных океанических апвеллингов (IPCC, 2014).

Межгодовая изменчивость характеристик Бенгельского апвеллинга исследовалась в большом количестве работ (Полонский, Серебренников, 2019б; Hagen et al., 2001; Campillo-Campbell, Gordo, 2002; Hardman-Mountford et al., 2003; Chen et al., 2012; Rouault et al., 2003; Lutz et al., 2015; Lamont et al., 2018; Vizu et al., 2018). Для описания апвеллинга в этих работах в основном используются данные о температуре поверхности океана (ТПО), которая является индикатором подъема холодных вод. В большинстве работ, в качестве характеристики апвеллингов использован термический индекс, рассчитанный по разнице ТПО в зоне апвеллинга и в удаленной зоне, расположенной за пределами апвеллинга (Chen et al., 2012; Полонский, Серебренников, 2019а, б). Эти работы позволили определить основные тенденции в интегральном изменении аномалии температуры БА, описать их связь с различными климатическими индексами и ветровым воздействием (Hagen et al., 2001; Hardman-Mountford et al., 2003; Полонский, Серебренников, 2019а, 2019б).

В то же время ряд работ показывает, что временная изменчивость индексов апвеллинга на севере и юге значительно отличаются (Hardman-Mountford et al., 2003; Чернышков, 2006; Tim et al., 2015; Lamont et al., 2018; Полонский, Серебренников, 2019б). Эти результаты убедительно свидетельствуют о том, что Бенгельский апвеллинг не может рассматриваться как однородная система в соответствии с предыдущими исследованиями, т.к. динамика его северной и южной части существенно различна. Одной из важных причин таких различий является влияние окружающих БА течений – Ангольского на севере и течения Агульяс на юге, усиление которых приводит к ослаблению апвеллинга под влиянием адвекции теплых вод (Hardman-Mountford et al., 2003; Rouault et al., 2007; Veitch et al., 2017; Vizu et al., 2018). Эти течения имеют собственную динамику, часто связанную с удаленным атмосферным воздействием.

Одной из важных характеристик апвеллинга является его площадь, которая характеризуется значительной сезонной и межгодовой изменчивостью (Hagen et al., 2001). Для исследования изменчивости площади апвеллинга используют различные методы, чаще всего основанные на визуальном выбранном критерии граничных значений аномалии или градиента температуры, концентрации хлорофилла А (Hagen et al., 2001; Nixon, Thomas, 2001; Demarcq et al., 2007). В работе (Hagen et al., 2001) для оценки площади апвеллинга использовалась изотерма 13°. На основе данных ТПО исследованы сезонные и межгодовые измене-

ния интенсивности и площади БА в 1982–1999 гг. Показано, что общая площадь апвеллинга в годы с интенсивным БА превышает площадь в годы со слабым БА примерно в три раза. В работах (Demarcq et al., 2015) для оценки ширины и изменчивости восточных апвеллингов использовалось фиксированное значений концентрации хлорофилла А 1 мг/м³. В работе (Полонский, Серебрянников, 2019а) для выделения зоны БА используется критерий разницы температуры $dt = 2.6^\circ$ относительно точки на той же широте отстоящей от положения средней фронтальной зоны на 1° долготы.

Следует отметить, что выбранные критерии неизбежно субъективны и основаны на визуальном анализе. Кроме этого, под размером апвеллинга обычно подразумевается не непосредственно область положительных вертикальных скоростей, а холодная или богатая хлорофиллом область, находящаяся под влиянием поднятых апвеллинговых вод. Размер этой области зависит от горизонтальной адвекции под действием экмановского транспорта, крупномасштабных течений и вихрями, рельефа дна, интенсивности вертикального перемешивания. Однако, именно эта площадь определяет зону наибольшей биологической продуктивности, исследование изменчивости имеет важную практическую ценность. Изменчивость пространственного распределения апвеллинговых вод определяет в какие районы проникнет холодные и богатые биогенными элементами глубинные воды.

Цель настоящей работы – определить сезонную и межгодовую изменчивость морфометрических характеристик Бенгельского апвеллинга – формы, площади и протяженности за более чем 30-летний период (1985–2016 гг.), а также исследовать ее связь с характеристиками крупномасштабных течений, определенных по измерениям спутниковых альтиметров.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ АПВЕЛЛИНГА

Используемые данные

Для исследования Бенгельского апвеллинга был выбран регион с координатами 40°–18° ю.ш. и 5°–20° в.д. В работе используется массив температуры (SST) (Reynolds et al., 2007), основанный на измерениях радиометров AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) и AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer). Данные за период 1985 – 2017 гг. имеют пространственное разрешение 0.25° и временную дискретность 1 день. Для определения скоростей течений в работе использовались картированные данные об абсолютной динамической топографии, полученные по комбинированным данным спутниковых аль-

тиметров, как сумма аномалии уровня морской поверхности (SLA) и средней динамической топографии (Mulet et al., 2013). Пространственное разрешение данных – 0.25° , временная дискретность – 1 сутки (delayed-time product).

Используя полученные массивы абсолютной динамической топографии, из уравнений геострофического баланса были рассчитаны поверхностные скорости геострофических течений с временным разрешением 7 дней на сетке $1/8 \times 1/8^\circ$ градуса:

$$u_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad v_g = \frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial x},$$

здесь h – уровень моря, u_g, v_g – геострофические скорости, $g = 9.8$ м/с² – ускорение свободного падения, $f = 10^{-4}$ с⁻¹ – параметр Кориолиса.

Метод идентификации апвеллинга по измерениям ТПО

В данной работе для идентификации зоны апвеллингов использовались среднемесячные карты ТПО. Для каждой карты рассчитывалась сглаженное по пространству распределение с помощью пространственной фильтрации скользящим средним с шириной окна $4 \times 4^\circ$. Далее сглаженное поле вычиталось из исходного для выделения аномалий температуры от их крупномасштабного распределения. Зоной апвеллинга на полученных картах аномалий считались зоны с аномалиями температуры относительно сглаженных ниже, чем -1° . Это значение было выбрано эмпирически на основе визуального анализа массива температуры за весь период времени. Отметим, что такое значение ниже, чем используемое в недавней работе (Полонский, Серебрянников, 2019а) – 2.6°C . Такие различия связаны с используемой методикой. В работе (Полонский, Серебрянников, 2019а) в качестве опорной температуры используется ТПО вод Атлантики за фронтом апвеллинга. В нашей работе проводится анализ разницы между температурой апвеллинга и сглаженным полем температуры, т.е. средним в квадрате $4 \times 4^\circ$ с центром в каждом узле сетки (см. квадрат на рис. 1, а). В среднее поле входит в том числе и ТПО самого апвеллинга, поэтому выбранный критерий в два раза ниже. Использование скользящего среднего позволяет эффективно выделить фронт апвеллинга, на котором происходит резкий рост отклонения ТПО от сглаженного поля.

На рис. 1 приведено сравнение карты ТПО и определенной с помощью предложенного метода зоны апвеллинга для февраля 2010 г. Как видно, выделенная зона визуально достаточно хорошо согласуется с зоной пониженных температур на карте ТПО т.е. зоной апвеллинга, а также зоной, ограниченной высокими градиентами температур (рис. 1, в). В этом конкретном случае апвел-

линг была смещена на север, а на юге апвеллинг практически отсутствовал.

Отметим, что выделение зоны апвеллинга по данным о ТПО может приводит к некоторым неточностям. Воды апвеллингового происхождения могут не достигать поверхности или распространяться на значительные расстояния за счет горизонтального переноса, а не за счет подъема. Тем не менее, данные об отрицательных аномалиях ТПО выступают определенным индикатором положения вод апвеллинга, исследованию изменчивости которого и посвящена настоящая работа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пространственное распределение гидрометеорологических характеристик в районе апвеллинга

Среднее распределение температуры, скорости и завихренности ветра, скорости течений в исследуемом районе изображено на рис. 2. На рис. 2, а отчетливо выделяется зона апвеллинга в которой температура понижена на 4–6 градусов относительно окружающей среды. Бенгельский апвеллинг можно разделить на две широкие области холодных вод с границей в районе 28° ю.ш. – на Северный (СБА) и Южный (ЮБА) Бенгельский апвеллинг (Hagen et al., 2001).

Как видно из карты среднего распределения скорости ветра по данным скаттерометра QuikSCAT такое разделение вызвано локальными особенностями поля ветра (рис. 2, в). Вблизи Африканского континента наблюдается две локальные зоны пониженных скоростей ветра со средней величиной менее 5 м/с. Данные скаттерометров с высоким разрешением показывают, что эти зоны связаны с возникновением зон ветровой тени за мысами Доброй надежды и Людериц. Эти зоны разделены областью высоких скоростей ветра в районе г. Людериц 28° , которые по-видимому связаны усилением скорости ветра при обтекании мыса. Сдвиг скорости определяет завихренность поля ветра, которая имеет локальные максимумы в областях низких скоростей и минимум в районе мыса. Рис. 2, б показывает, что распределение завихренности ветра во многом определяет положение области подъема наиболее холодных вод на поверхность.

Карта средних геострофических течений в данном районе представлена на рис. 2, г. В северной части апвеллинга расположено южное Ангольское течение, которое также несет теплые экваториальные воды в зону апвеллинга, подавляя его развитие. В южной части континента северные течения частично обусловлены ответвлением течения мыса Игольный. Эти течения несут теплые воды Индоокеанского происхождения на север. Кроме того, градиенты плотности на фронте

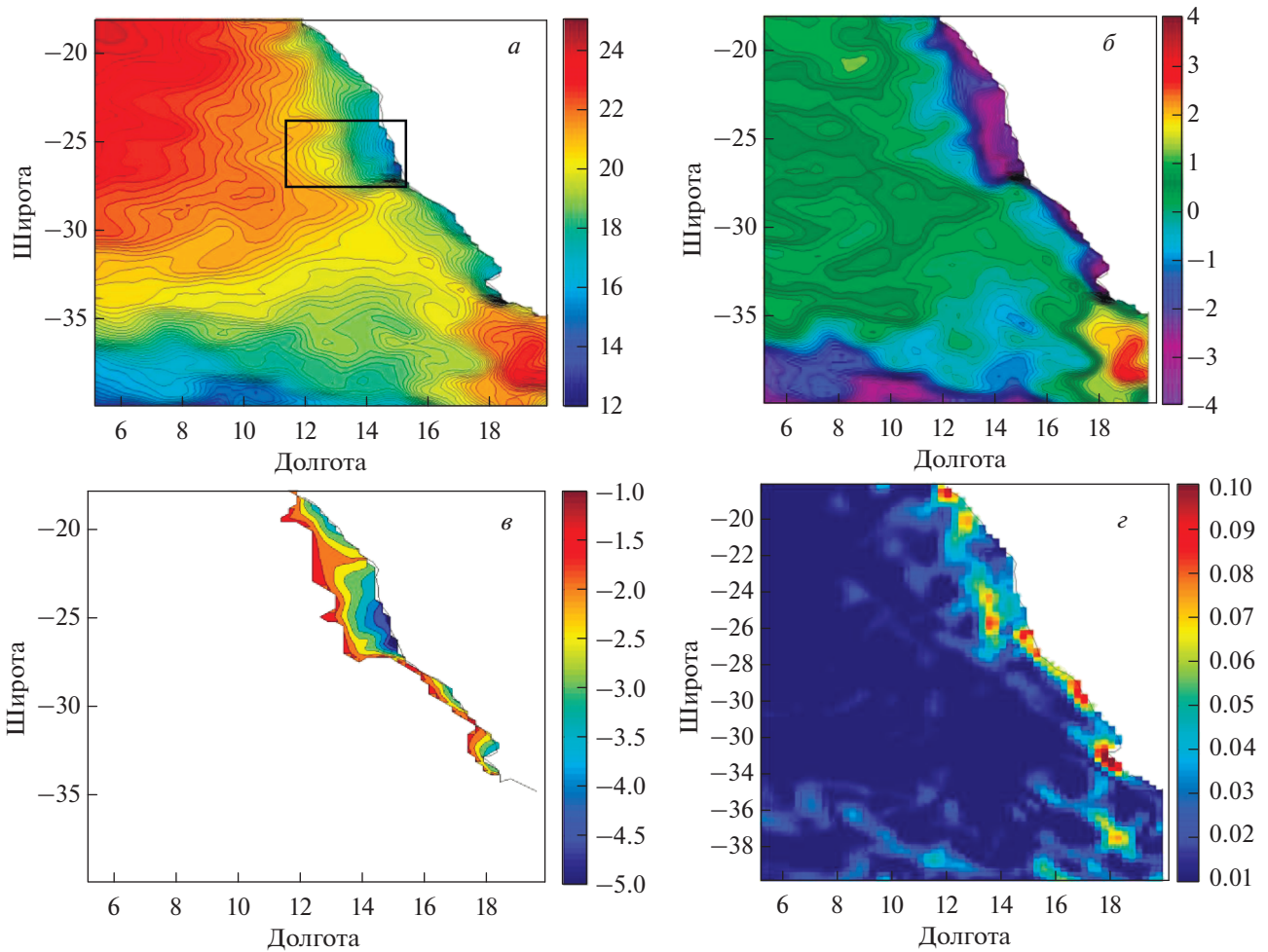


Рис. 1. Пример выделения апвеллинга: карта среднемесячной температуры ($^{\circ}\text{C}$) в феврале 2010 года (а), карта аномалии температуры от сглаженного скользящим средним ($4 \times 4^{\circ}$) (б) и выделенная по аномалии ТПО зона апвеллинга (в), карта градиентов температуры (г).

апвеллинга приводят к образованию северных геострофических течений, скорость которых, таким образом, зависит от интенсивности апвеллинга.

Сезонная изменчивость площади и ТПО в Бенгельском апвеллинге

На рис. 3 изображен сезонный ход температуры и ее аномалии в зоне апвеллинга, а также площади апвеллинга. Максимальные температуры в зоне апвеллинга наблюдаются в астральное лето с февраля по март (порядка 18°C .), а наименьшие — в августе–октябре (около 14.5°C) в согласии с предыдущими работами (Campillo-Campbell, Godoa, 2002; Полонский, Серебренников, 2019а). В то же время пространственные аномалии температуры имеют противоположный ход. Максимальные отрицательные аномалии (-1.9°C) наблюдаются в марте–апреле, а максимальные положительные (1.2°C) — в сентябре–октябре.

Возникающие под действием вертикальных движений аномалии температуры в поверхностном слое зависят от вертикальных градиентов температуры в этом слое, которые намного выше в период прогрева, и ниже в период зимнего перемешивания. В результате наибольшая разница между ТПО в районе апвеллинга наблюдается в период прогрева. Для примера на рис. 4 приведены средние карты ТПО за апрель и октябрь. В апреле центральная Атлантика прогрета сильнее, чем в октябре (ТПО составляет 22° и 17° , соответственно). В то же время минимальная ТПО апвеллинга меняется менее значительно от 14 до 12° . Таким образом, изменение аномалии ТПО на сезонных масштабах зависит в большей степени от сезонного хода и особенностей вертикального прогрева в центральной Атлантике, чем непосредственно от интенсивности апвеллинга. Это говорит о том, что анализ термических индексов (аномалии температуры) может приводить к

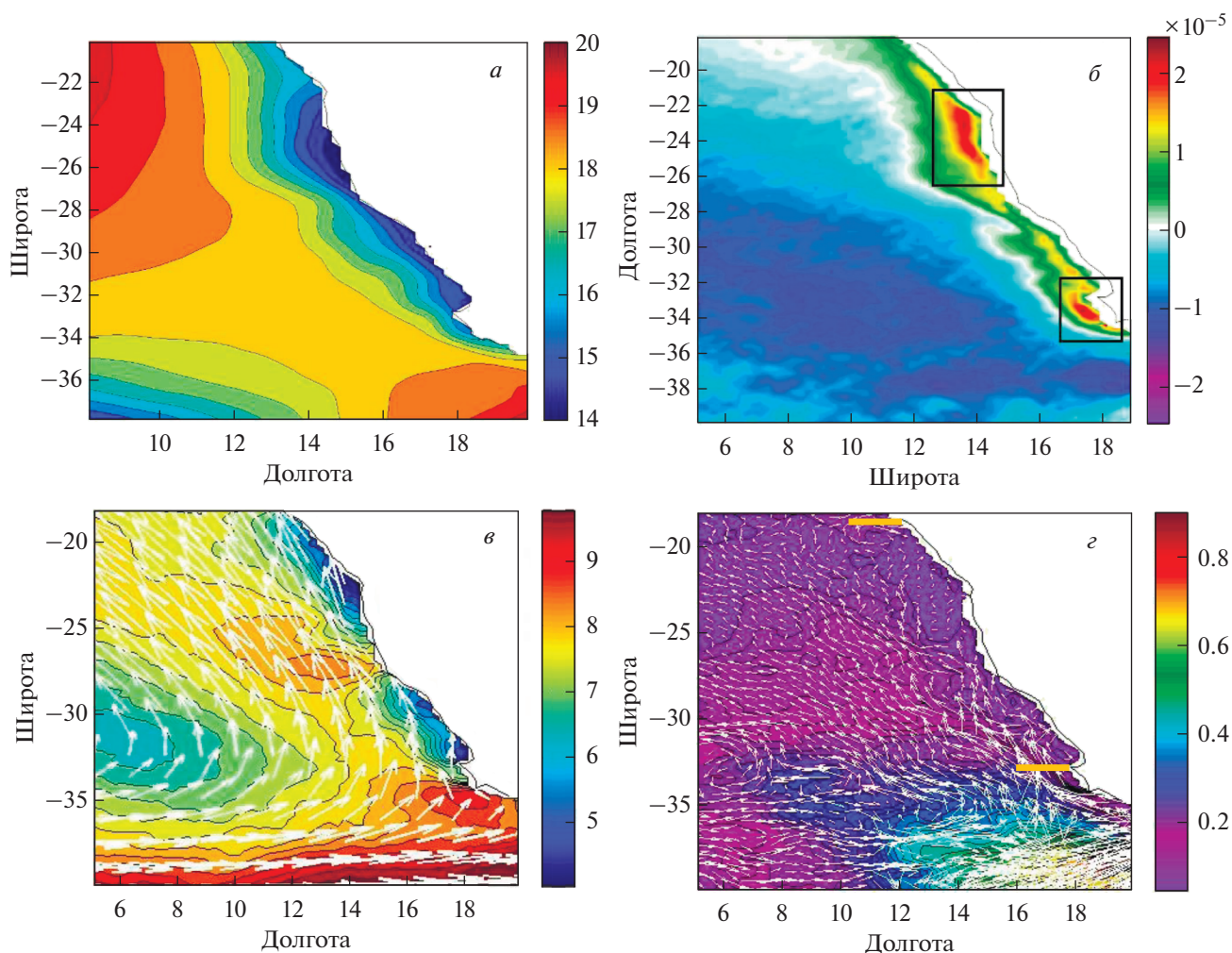


Рис. 2. Пространственное распределение средней ТПО (*а*, °С), завихренности (*б*, 1/с) и скорости ветра (*в*, м/с), скорости течений (*г*, м/с) по данным спутниковых измерений в исследуемой области.

ошибкам в оценке изменчивости апвеллинга на сезонных масштабах, на которых анализ абсолютных значений ТПО дает более верные результаты. Однако, на масштабах более года эти ошибки будут усредняться и использование термических индексов приемлемо.

Еще одной важной характеристикой апвеллинга, отражающей изменчивость его интенсивности является его площадь (зеленая линия на рис.3), которая имеет существенно отличный сезонный ход. Площадь апвеллинга максимальна и практически одинакова с апреля по июль, когда она составляет около 380000 км². В сентябре-ноябре отмечается сезонный минимум площади апвеллинга, когда она уменьшается практически в 2 раза. Эти особенности сезонного хода хорошо видны визуально на рис. 5. Несмотря на то, что ТПО апвеллинга принимает минимальное значение в октябре, в апреле площадь БА намного выше, чем в октябре.

Отметим, что сезонная изменчивость интенсивности апвеллинга в различных его частях значительно отличается (Tim et al., 2015). Для исследования пространственной изменчивости сезонного года была построена сезонная диаграмма ширины апвеллинга для различных широт (рис. 5). Максимальной ширины (в среднем 200 км) апвеллинг достигает в районе п. Людериц (между 22° и 26° ю.ш.). Южнее его у мыса расположен минимум. В этом районе данные скаттерометров фиксируют минимум завихренности (рис. 2, б) из-за топографических эффектов обтекания мыса. Еще одной причиной этого минимума может являться сток вод реки Оранжевая, который приводит к росту халинной стратификации и формированию тонкого теплого верхнего слоя, не позволяющего наблюдать апвеллинг по данным о ТПО. Следующий максимум (область 2 на рис. 2, б) с шириной около 130 км расположен на широтах 28°–30° ю.ш. Наконец, третий максимум со зна-

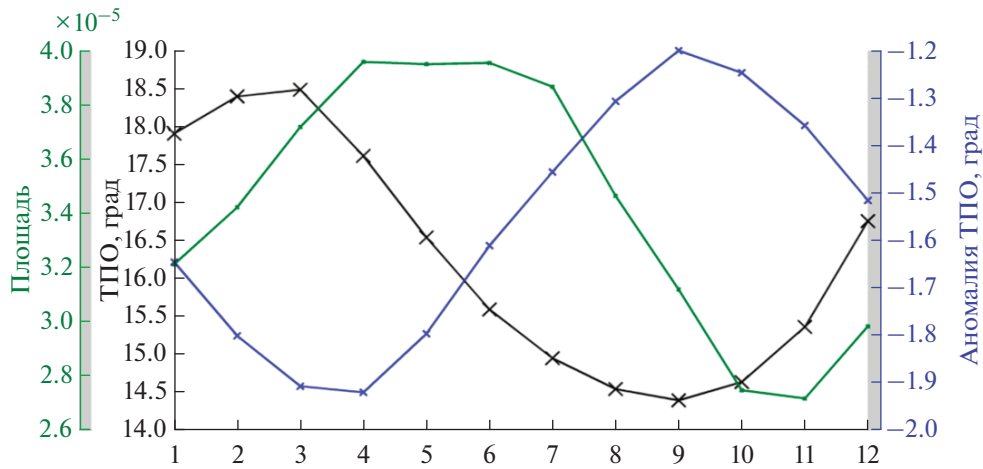


Рис. 3. Сезонный ход средней температуры (°C), аномалии температур (°C) и площади (км²) в апвеллинге.

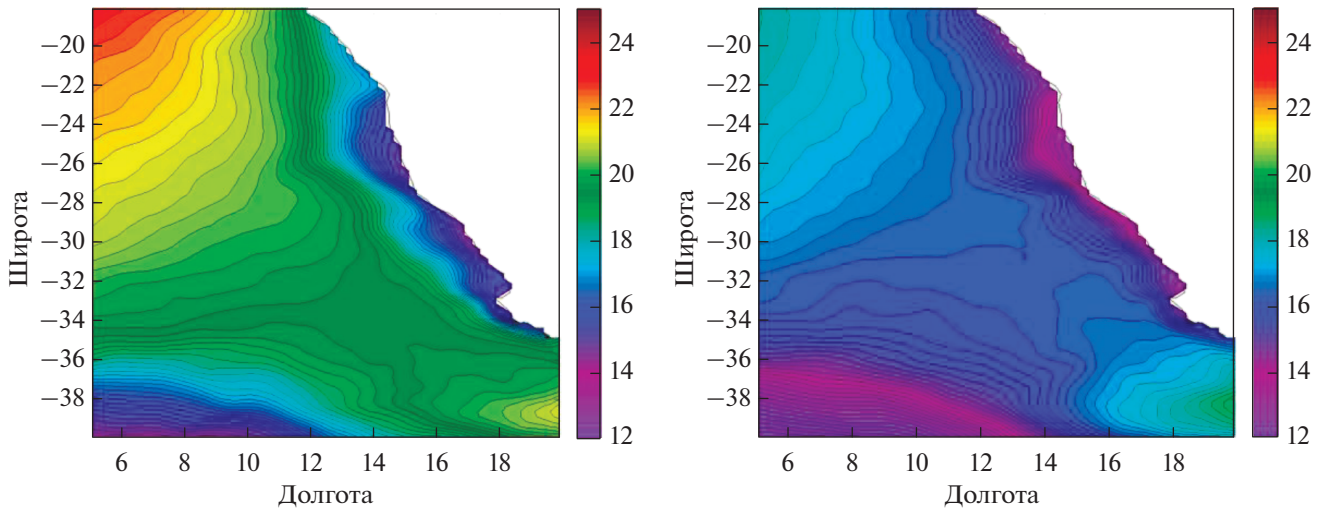


Рис. 4. Карта средней температуры (°C) за апрель (слева) и октябрь (справа) 1985–2016 гг.

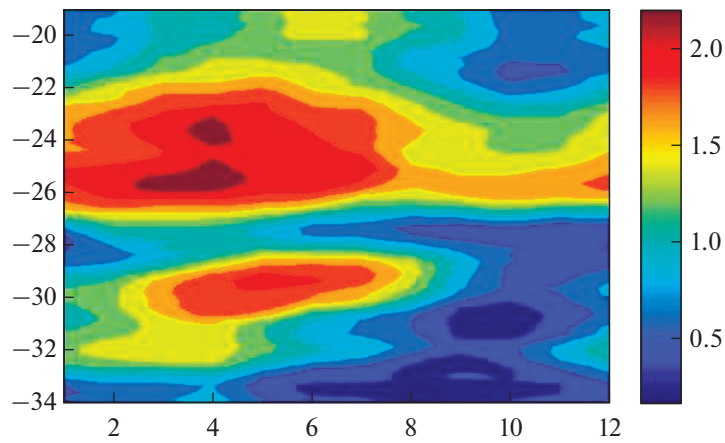


Рис. 5. Сезонная изменчивость средней широты апвеллинга (°) на различных широтах.

чениями 100 км расположен в наиболее южной части континента на широте 32° ю.ш.

Сезонный ход ширины апвеллинга характеризуется наличием двух зон наиболее интенсивной изменчивости. Первая более широкая зона СБА располагается севернее 27° ю.ш. Она характеризуется увеличением ширины (L) в период с января по июль до значений $L = 2^\circ$ (200 км) и максимумом в апреле ($L = 2.2^\circ$). В августе–декабре ширина СБА значительно уменьшается, в первую очередь, в северной части этой зоны. В наиболее северной части апвеллинга (18–21° ю.ш.) наибольшая площадь отмечается в апреле–августе, а в январе–феврале и октябре–ноябре принимает минимальные значения. В южной части СБА, на широтах 25–26°, ширина апвеллинга остается достаточно высокой во все сезоны и даже в период минимума не снижается ниже $L = 1.5^\circ$ (150 км). Таким образом на этих широтах апвеллинг достаточно интенсивен в течении всего года.

Вторая зона – ЮБА располагается на 29–33° ю.ш. Время наступления максимума ее площади отстает от первой примерно на 1–2 мес. Наибольшая ширина ЮБА ($L = 1.7–2^\circ$) наблюдается в период с марта по июль, а в остальное время на данной широте не превышает 1°. В октябре ширина апвеллинга падает практически до 0, т.е. апвеллинг в этой части акватории исчезает.

Важной причиной такого сезонного хода площади апвеллинга является влияние течений, окружающих его с севера (Ангольское течение) и юга (течения Агульяс). Для исследования сезонного хода этих течений по данным спутниковой альтиметрии была проанализирована изменчивость меридиональной скорости течений на двух зональных разрезах, окружающий апвеллинг с севера и юга (разрезы показаны на рис. 2, *г*).

Рис. 6, *в* показывает, что на сезонных масштабах изменчивость средней ширины апвеллинга на широтах 18–25° ю.ш. и сезонный ход меридиональной скорости течений (м/с) в северной части на широты 18° ю.ш. практически совпадает. Интенсификация южного Ангольского течения сопровождается уменьшением площади СБА. В северной части апвеллинга усиление Ангольского течения происходит в январе–феврале и октябре (рис. 6, *а*, *б*, *в*). Как видно из рис. 5, именно в этот период отмечается резкое уменьшение площади апвеллинга в северной части СБА (18–24° ю.ш.). Наоборот, сезонный минимум Ангольского течения в июне приводит к продвижению БА на север. Таким образом, именно сезонный ход Ангольского течения оказывает важное влияние на площадь северной части БА, которое прослеживается до широт 24° ю.ш.

Сезонный ход меридиональной компоненты течений на разрезе 33° ю.ш. в ЮБА показан на рис. 6, *б*. Северные течения в этой области прино-

сят теплые воды от мыса Игольный в зону БА. Анализ показывает, что интенсификация северных течений происходит в декабре–феврале, а их ослабление в июне–октябре. Такая изменчивость совпадает с сезонным ходом аномалии ТПО (рис. 3), но не коррелирует с его площадью. Однако, существенная сезонная изменчивость наблюдается не только в интенсивности северного течения, но и в положении динамического фронта (белый цвет на рис. 6, *б*). В сентябре–ноября струя прижимается к континенту и находится в непосредственной близости от берега. Именно в это время наблюдается и минимум площади ЮБА.

Отметим, что изменчивость скорости течений, положение динамического фронта и интенсивность апвеллинга связаны. Рост градиентов плотности на фронте апвеллинга при увеличении аномалии ТПО в зимний период может являться важной причиной интенсификации геострофических северных течений. Этот эффект усиливает затоки теплых вод с юга, что в свою очередь, приводит к дополнительному росту аномалии ТПО. Интенсификация экмановского транспорта от берега приводит к усилению апвеллинга, который способен смещать динамические фронты на запад. Ослабление апвеллинга в осенний период уменьшает этот эффект, в результате чего северное теплое течение Агульяс прижимается к берегу, дополнительно препятствуя подъему холодных вод на поверхность.

Межгодовая изменчивость характеристик апвеллинга

Межгодовая изменчивость общей площади апвеллинга и ее диаграмма по сезонам в различные годы показана на рис. 7. Максимальные площади отмечаются преимущественно в марте–июне, когда по данным ТПО они оцениваются в 250–350 тыс. км², а в некоторые месяцы, например, в мае 2000 и 2003 г. достигает 400 тыс. км². Минимальные площади отмечаются с сентября по ноябрь, когда общая площадь апвеллинга снижается в 2 раза до 150 тыс. км². В отдельные годы наблюдались минимальные значения площади, около 100 тыс. км², например, в ноябре 1995 и 2013 гг. Наблюдается выраженная изменчивость по амплитуде сезонного хода, и времени наступления максимума/минимума площади. В некоторые годы пик площади отмечается в июне (1998, 2011 г.), в некоторые в мае (2000, 2003 г.), а в последние годы в апреле или даже в марте. в некоторые в апреле (2005, 2010 г.), а в последние годы в апреле (2013, 2015 г.) или даже в марте (2014, 2016 г.). Таким образом, наблюдается тенденция к более раннему развитию апвеллинга после 2010 г. Кроме этого, характерной чертой является рост сезонных коле-

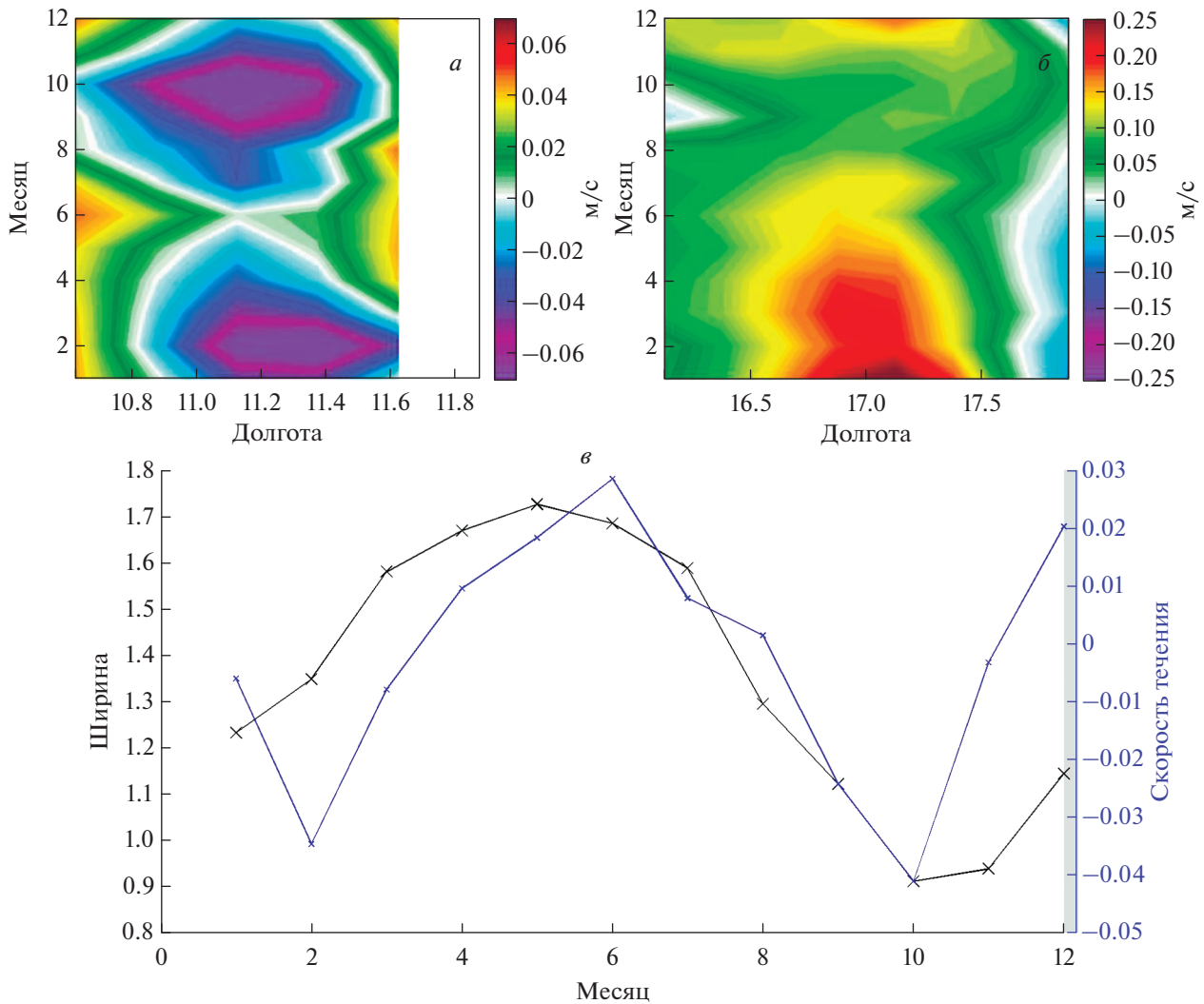


Рис. 6. Сезонный ход меридиональной скорости течений (м/с), по данным спутниковой альтиметрии на широтном разрезе 18° ю.ш. (а) и 33° ю.ш. (б, в) Сезонная изменчивость средней ширины апвеллинга (°) на широтах 18–25° ю.ш. и средней меридиональной скорости течений (м/с) на широте 18° ю.ш., долготы 10–11° з.д. (рис. 6, в). Положительные значения скорости на рис. 6, а–в направлены на север.

баний площади апвеллинговой зоны, особенно хорошо видных по рис. 7, а. До 1995 года они были менее выражены, чем в последующий период.

На рис. 8 изображена межгодовая изменчивость аномалии ТПО и площади БА, сглаженная скользящим средним с шириной окна 365 дней. Выраженнейшей особенностью этого графика является усиление отрицательной аномалии ТПО в апвеллинге после 2000-х годов. С 2000 по 2015 г. аномалия увеличилась от значения -1.5° до -1.8°C , что свидетельствует об интенсификации апвеллинга. Площадь апвеллинга и аномалия ТПО в основном находятся в противофазе, т.е. понижение температуры (интенсификация) апвеллинга сопровождается ростом его площади. Однако, в изменчивости площади отсутствует выраженный

тренд, которая осталась практически одинаковой со средним значением около 340000 км^2 .

Такие различия свидетельствуют о том, что несмотря на выраженный рост температуры в окружающих водах, связанный с глобальным потеплением океана (Johnson et al., 2020), температура в области апвеллинга остается стабильной и ее разница с окружающими водами растет. Это подтверждает карта трендов ТПО на рис. 9, а. Отсутствие роста температуры (тренд ТПО близок к 0) отмечается вблизи берега на широтах $20\text{--}35^{\circ}$ ю.ш., а также в полосе $20\text{--}30^{\circ}$ ю.ш в водах центральной Атлантики, подверженных влиянию апвеллинга. В то же время в водах южной Атлантики (южнее 35° S) тренд составляет 0.02°C в год, а в северной части (севернее 20° S) в районе Гвинейского течения составляет 0.04°C в год. Отсутствие трендов

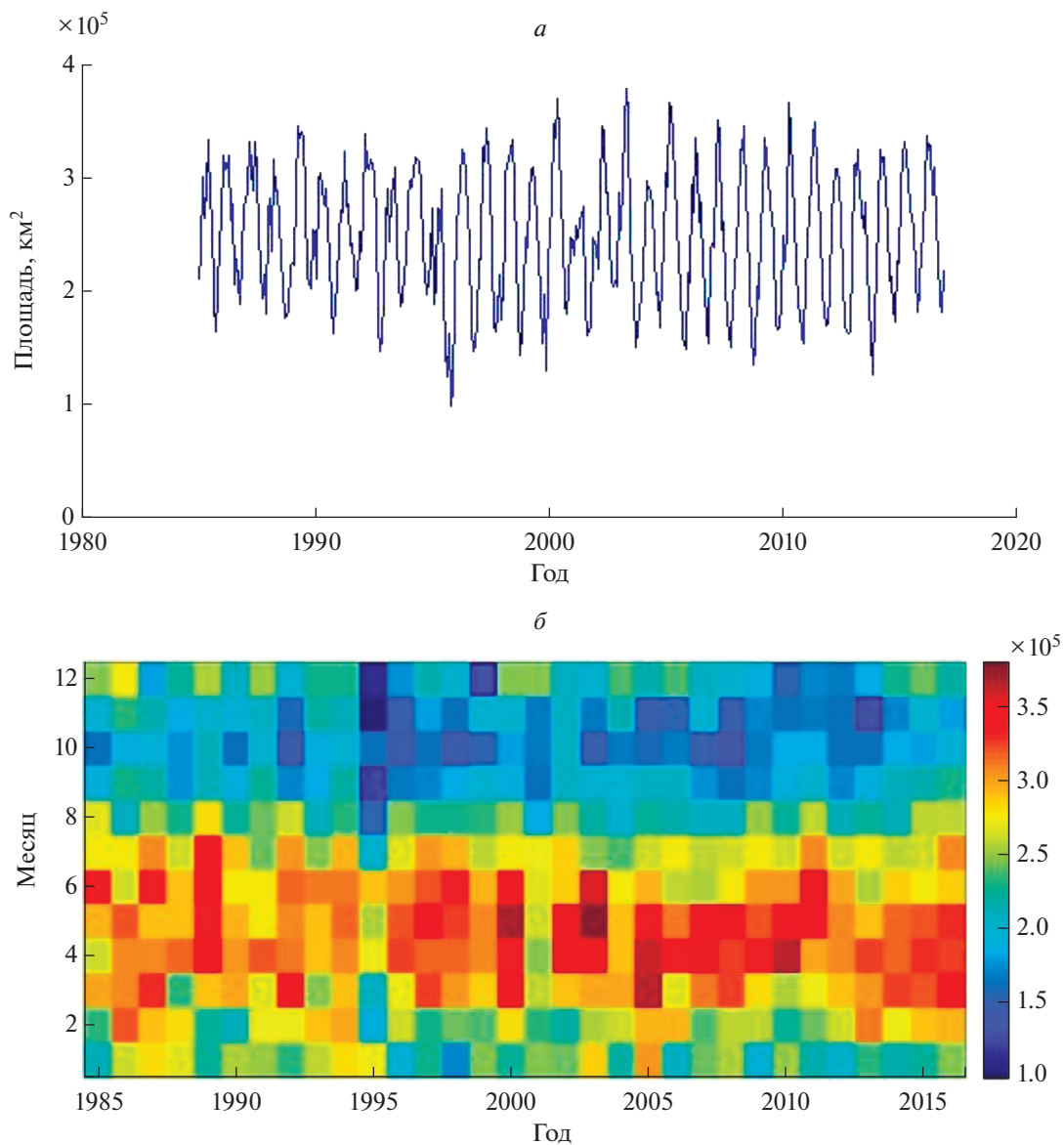


Рис. 7. Диаграмма среднемесячной площади апвеллинга (а) и диаграмма аномалий ТПО в апвеллинге (б).

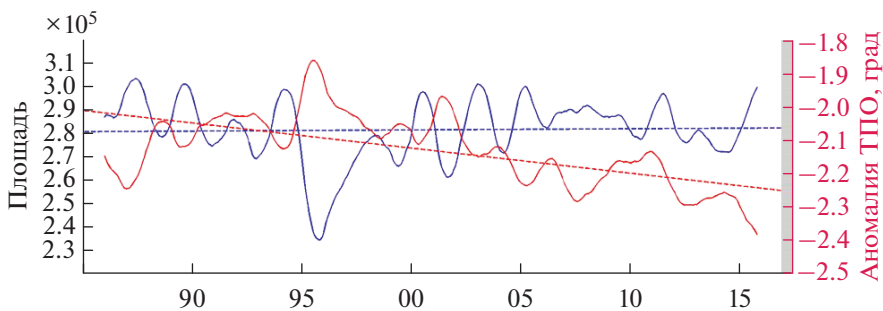


Рис. 8. Межгодовая изменчивость площади Бенгельского апвеллинга (синяя линия, км²) и аномалии ТПО (красная линия, °С) в нем, сглаженная годовым скользящим средним. Пунктирные линии показывают линейные тренды для обоих рядов.

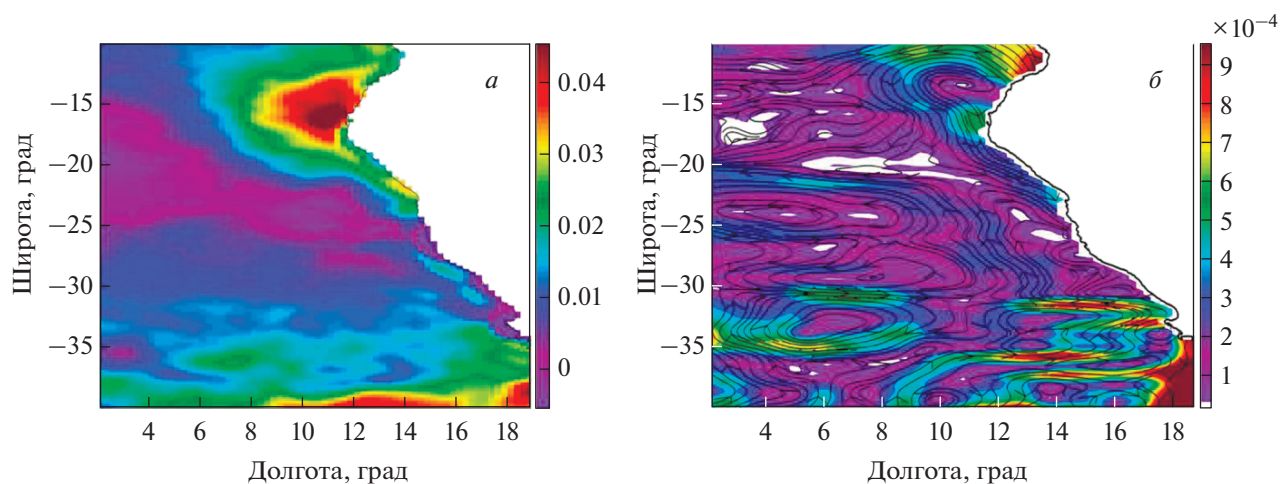


Рис. 9. Пространственное распределение: *a* – трендов ТПО (°/год) и *б* – скорости течений (м/с в год).

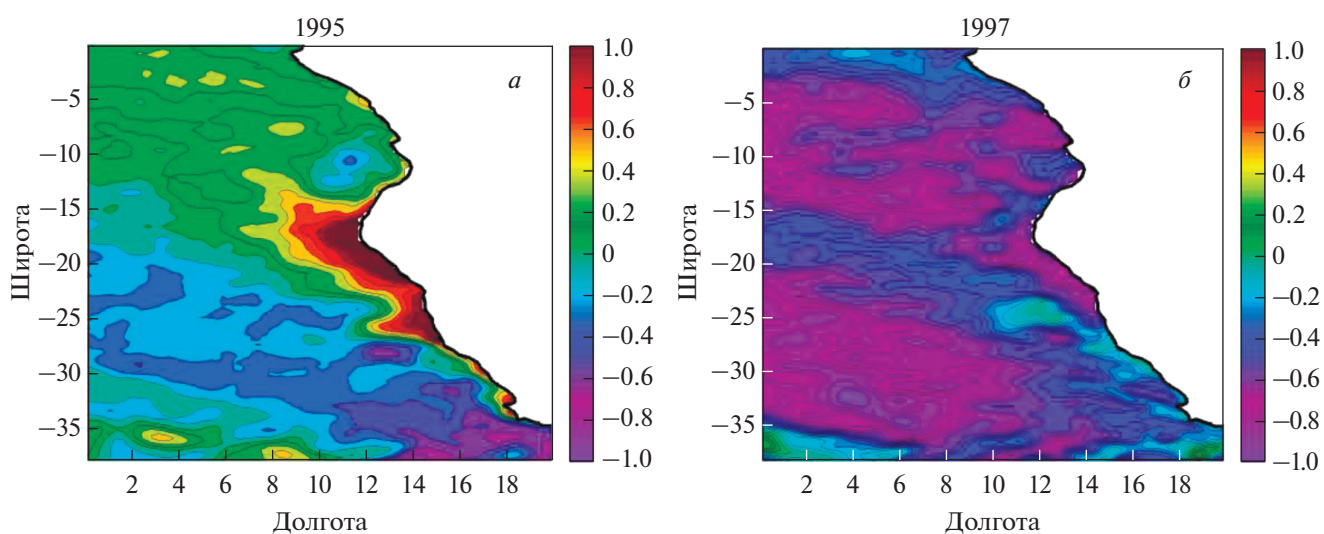


Рис. 10. Примеры карт среднегодовых аномалий температур (°C) от среднего распределения за 1985–2017 гг (°C) за 1995 (*a*) и 1997(*б*) года.

температуры в центральной части БА, несмотря на глобальное потепление, свидетельствует об интенсификации апвеллинга.

Средние тенденции накладываются на значительные межгодовые колебания характеристик апвеллинга. Наиболее выраженное уменьшение аномалии ТПО в апвеллинге, сопровождавшееся значительным уменьшением зоны апвеллинга отмечено в 1995–1996 гг. (рис. 8, *a*) (-1.5°C), когда площадь достигла своего минимума $3 \times 10^5 \text{ км}^2$, что на 15% меньше, чем в обычные годы. Пример карты аномалии ТПО в 1995 и 1997 гг. от ее среднего распределения за 1985–2017 гг. представлены на рис. 10, *a*. В 1995 г. в районе СБА аномалии ТПО достигли рекордных значений $+3^{\circ}$, что связывается в работе (Hardman-Mountford 2003) с со-

бытиями Бенгельского (Атлантического) Эль-Ниньо, которое привело к росту температуры на экваторе и транспорту этих теплых вод в районе БА.

В апреле 1997 г. аномалии ТПО в северной части превышали -3° , а в остальных районах 1° . Сильное понижение температуры океана в 1997 г. связано с эпизодом Тихоокеанского Эль-Ниньо 1997–1998 гг. (рис. 10, *б*) (Hardman-Mountford 2003). Оно сопровождалось аномально северным положением Южно-Атлантического антициклона, ростом давления в его центре, ослаблением Ангольского течения, усилением Бенгельского течения и прибрежного апвеллинга в северной части ЮВА. (Hardman-Mountford 2003).

Форма апвеллинга подвержена значительным межгодовым изменениям, особенно выражен-

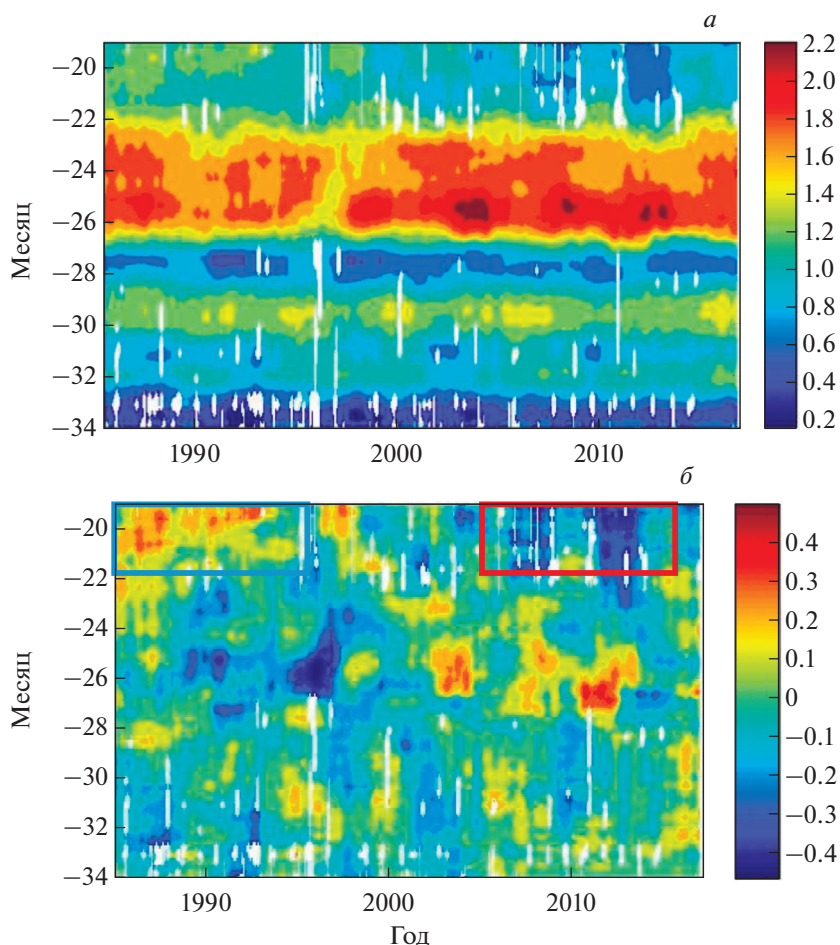


Рис. 11. Ширина апвеллинга (*а*) и ее аномалия (*б*) в градусах от средней по времени на различных широтах. Синим прямоугольником отмечена зона максимума, а красным – минимума.

ным в его северной части. Информацию о ее изменчивости дает рис. 11, на котором представлена среднемесячная ширина апвеллинга на разных широтах и ее аномалия от средних значений. В самой северной части исследуемого района на широтах 19–22° ю.ш. высокие значения ширины апвеллинга (150 км) отмечались до 2000 г. (голубой прямоугольник на рис. 11, *а*). Далее происходит их резкое падение, и средняя ширина уменьшается практически в 3 раза до величин 50 км (красный прямоугольник на рис. 11, *б*). Карта трендов температуры на рис. 9 также демонстрирует резкий рост ТПО в северной части апвеллинга на широтах 10–25° ю.ш. В этой части района значительное влияние на апвеллинг оказывает Ангольское течение, приносящее теплые экваториальные воды. Причиной такого увеличения ТПО является усиление Ангольского течения, которое приносит теплые экваториальные воды в северную часть апвеллинга, что приводит к наблюдаемому уменьшению его площади. Тренды скорости течений, построенные по альтиметрическим изме-

рениям за 1992–2019 гг. изображены на рис. 9, *б*. Как видно, в области повышения ТПО произошло усиление южного Ангольского течения, которое и привело к резкому сокращению его площади в северной части, отмечаемому на рис. 11, *б*.

В то же время на широтах 23–28° ю.ш. произошло резкое увеличение площади на ту же величину – около 100 км. Таким образом, несмотря на то, что суммарная площадь апвеллинга осталась постоянной, произошло резкое изменение формы апвеллинга. Ослабление и уменьшение апвеллинга в его самой северной части, произошло одновременно с его усилением и расширением в южной части СБА.

В южной части апвеллинга также присутствуют межгодовые колебания. Так в районе на широтах 29° и 32° ю.ш. апвеллинг достигал максимума ширины в 2016 (около 160 км) и 1991 (около 140 км) году, а минимума в 1996 (около 130 км) и 2010 (около 120 км) году. В то же время значительных трендов в этой части не наблюдаются. В южной части апвеллинга также присутствуют межгодовые

колебания. Так в районе на широтах 29° и 32° ю.ш. апвеллинг достигал максимума ширины в 2016 (около 160 км) и 1991 (около 140 км) году, а минимума в 1996 (около 130 км) и 2010 (около 120 км) году. В то же время значительных трендов в этой части не наблюдаются.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе на основе спутниковых измерений поверхностной температуры даны количественные оценки сезонной и межгодовой изменчивости площади и ширины Бенгельского апвеллинга за более чем 30-летний период (1985–2016). На основе данных спутниковых альтиметров проведено исследование их связи с крупномасштабными течениями.

В работе показано, что на сезонных масштабах изменчивость ширины апвеллинга в его южной и северной части имеет свои особенности, частично связанные с влиянием окружающих крупномасштабных течений. Северная часть Бенгельского апвеллинга (СБА) (18–26° S) характеризуется увеличением площади в период с января по июль и минимумом в августе–декабре. В августе–декабре ширина СБА значительно уменьшается, в первую очередь, в северной части этой зоны. В наиболее северной части апвеллинга (18–21° ю.ш.) наибольшая площадь отмечается в апреле–августе, а в январе–феврале и октябре–ноябре принимает минимальные значения. Такие изменения связаны с интенсификацией южного Ангольского течения, которое происходит в феврале и октябре, влияние которого прослеживается до 24° S. В южной части СБА, на широтах 25–26°, ширина апвеллинга остается достаточно высокой во все сезоны и даже в период минимума не снижается ниже $L = 1.5^\circ$ (150 км). Таким образом на этих широтах апвеллинг достаточно интенсивен в течении всего года. Максимум в Южной части (28–32°С) Бенгельского апвеллинга (ЮБА) наблюдается на 1–2 мес. позже в мае–июне, а в сентябре–ноябре ЮБА практически исчезает. В осенние месяцы струя северного течения Агульяс прижимается к берегу Африки, способствуя резкому уменьшению площади ЮБА.

На межгодовых масштабах отмечается выраженная изменчивость аномалии ТПО, площади апвеллинга и времени наступления ее пика. На фоне резкого роста ТПО в Южной Атлантике, в районе апвеллинга ТПО остается постоянной, т.е. аномалия ТПО в апвеллинге растет, что свидетельствует о его интенсификации. Общая площадь апвеллинга осталась практически постоянной, выраженные тренды отсутствуют. Однако, форма апвеллинга существенно изменилась. В самой северной части исследуемого района на широтах 19–22° ю.ш. высокие значения ширины апвеллинга (150 км) отмечались до 2000 г. После

этого, происходит их резкое падение, и средняя ширина уменьшается практически в 3 раза до величин 50 км. Такие изменения связаны с усилением южного Ангольского течения, которое фиксируется по измерениям альтиметров. В то же время на широтах 23–28° ю.ш. произошло резкое увеличение площади на ту же величину – около 100 км. Таким образом, ослабление и уменьшение апвеллинга в его самой северной части СБА, произошло одновременно с его усилением и расширением в южной части.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование изменчивости морфометрических характеристик апвеллинга выполнено при поддержке гранта РФФИ. Исследования ТПО апвеллинга выполнены при поддержке Госзадания 0555-2021-0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Полонский А.Б., Серебренников А.Н.* Об изменении температуры поверхности океана в зоне Бенгельского апвеллинга. Часть 1: сезонный цикл // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 33–44.
- Полонский А.Б., Серебренников А.Н.* Об изменении температуры поверхности океана в зоне бенгельского апвеллинга. Часть 2: многолетние тенденции // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 4. С. 29–39.
- Чернышков П.П.* Мезомасштабная изменчивость термической структуры верхнего слоя океана на полигоне в Экваториальной Атлантике // Докл. II Всесоюз. конфер. по изучению открытой части Атлантического океана. Калининград: АО ИОАН, 1982. С. 56–59.
- Backeberg B.C., Penven P., Rouault M.* Impact of intensified Indian Ocean winds on mesoscale variability in the Agulhas system // Nature Climate Change. 2012. V. 2. № 8. P. 608–612.
- Campillo-Campbell C., Gordo A.* Physical and biological variability in the Namibian upwelling system: October 1997–October 2001 // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2004. V. 51. № 1–3. P. 147–158.
- Chen Z. et al.* A study of Benguela upwelling system using different upwelling indices derived from remotely sensed data // Continental shelf research. 2012. V. 45. С. 27–33.
- Demarcq H., Barlow R., Hutchings L.* Application of a chlorophyll index derived from satellite data to investigate the variability of phytoplankton in the Benguela ecosystem // African J. Marine Science. 2007. V. 29. № 2. P. 271–282.
- Hagen E., Feistel R., Agenbag J. J., Ohde T.* Seasonal and interannual changes in intense Benguela upwelling. Oceanologica Acta, 2001. V. 24. P. 557–568.
- Hardman-Mountford N.J., Richardson A.J., Agenbag J.J., Hagen E., Nykjaer L., Shillington F.A., Villacastin C.* Ocean climate of the South East Atlantic observed from satellite data and wind models. Prog Oceanogr. 2003. V. 59. P. 181–221.
- Lotakin P.D.* Upwelling in the Kerch strait and the adjacent waters of the Black sea based on the contact and satellite data // Physical Oceanography. 2018. V. 25. № 2.

- Lamont T. et al.* Upwelling indices for comparative ecosystem studies: Variability in the Benguela Upwelling System // *J. Marine Systems*. 2018. V. 188. P. 3–16.
- Lutz K., Jacobeit J., Rathmann J.* Atlantic warm and cold-water events and impact on African west coast precipitation. *International J. Climatology*. 2015. V. 35. № 1. P. 128–141.
- Nixon S., Thomas A.* On the size of the Peru upwelling ecosystem // *Deep Sea Research. Part I. Oceanographic Research Papers*. 2001. V. 48. № 11. P. 2521–2528.
- Pachauri R.K. et al.* Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Ipcc*, 2014. P. 151.
- Reynolds R.W. et al.* Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature // *J. Climate*. 2007. V. 20. № 22. P. 5473–5496.
- Rouault M., Florenchie P., Fauchereau N., Reason C.J.C.*, South East Tropical Atlantic Warm Events and Southern African Rainfall, *Geophys. Res. Lett.*, 2003. V. 30. № 5.
- Strub P.T., Shillington F.A., James C., Weeks S.* Satellite comparison of the seasonal circulation in the Benguela and California current systems. *South African J. Marine Science*. 1998. V. 19. P. 99–112.
- Tim N., Zorita E., Hünicke B.* Decadal variability and trends of the Benguela upwelling system as simulated in a high-resolution ocean simulation. *Ocean Sci*. 2015. V. 11. P. 483–502
- Vizy E. K., Cook K. H.* Mesoscale convective systems and nocturnal rainfall over the West African Sahel: role of the Inter-tropical front // *Climate dynamics*. 2018. V. 50. № 1–2. P. 587–614.
- Veitch J.A., Penven P.* The role of the Agulhas in the Benguela Current system: A numerical modeling approach // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2017. V. 122. № 4. P. 3375–3393.

Variability of the Area and Shape of the Benguela Upwelling in 1985–2017 and Its Relationship with Dynamic Characteristics from Satellite Measurements

V. A. Pavlushin¹ and A. A. Kubryakov¹

¹*Federal State Budget Scientific Institution “Marine Hydrophysical Institute of RAS”, Sevastopol, Russia*

The seasonal and interannual variability of the morphometric characteristics of the Benguela upwelling – shape, area and length is investigated based on satellite measurements of the ocean surface temperature (SST) for 1985–2016. The northern part of the Benguela Upwelling (NBA) (18–26° S) is characterized by an increase in area from January to July and a minimum in August–December. In the northernmost part of the NBA (18–21° S), the largest area is observed in April–August, the minimum values – in January–February and October–November. Such variability is partly related to the intensification of the southern Angola current, which is observed by altimetry data in February and October. The impact of this current on BAh can be traced up to 24° S. The maximum in the southern part (28–32°C) of the Benguela upwelling (SBA) is observed 1–2 months later than in NBA in May–June, and in September–November SBA practically disappears. In the autumn months, the stream of the northern current of the Agulhas presses to the coast of Africa, contributing to a sharp decrease in the area of SBA. On interannual scales, there is a pronounced variability in the upwelling area and the time of its peak. After 2010, there is a tendency towards an earlier onset of upwelling. In the northernmost part of the study area, at latitudes 19–22° S, high values of the upwelling width (150 km) were noted until 2000. Further, they sharply decrease, and its average width decreases almost 3 times to values of 50 km. At the same time, at latitudes 23–28° S, there was a sharp increase in the area by the same amount – about 100 km. Thus, despite the fact that the total upwelling area remained constant, there was a sharp change in the upwelling shape. The weakening and decrease of upwelling in its northernmost part is probably caused by the long-term strengthening of the Angola Current, which is observed in altimetry data.

Keywords: Benguela upwelling, upwelling area, Angola current, seasonal and interannual variability, ocean surface temperature, satellite measurements, currents

REFERENCES

- Backeberg B.C., Penven P., Rouault M.* Impact of intensified Indian Ocean winds on mesoscale variability in the Agulhas system // *Nature Climate Change*. 2012. V. 2. № 8. P. 608–612.
- Campillo-Campbell C., Gordo A.* Physical and biological variability in the Namibian upwelling system: October 1997–October 2001 // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2004. V. 51. № 1–3. P. 147–158.
- Chen Z. et al.* A study of Benguela upwelling system using different upwelling indices derived from remotely sensed data // *Continental shelf research*. 2012. V. 45. C. 27–33.
- Chernyshkov P.P.* Mezomasshtabnaya izmenchivost' termicheskoi struktury verkhnego sloya okeana na poligone v Ehkvatorial'noi Atlantike // *Doklady II Vsesoyuz. konfer. po izucheniyu otкрыtoy chasti Atlanticheskogo okeana*. Kaliningrad: AO IOAN, 1982. P. 56–59.
- Demarcq H., Barlow R., Hutchings L.* Application of a chlorophyll index derived from satellite data to investigate the

- variability of phytoplankton in the Benguela ecosystem // African J. Marine Science. 2007. V. 29. № 2. P. 271–282.
- Hagen E., Feistel R., Agenbag J. J., Ohde T. Seasonal and interannual changes in intense Benguela upwelling. *Oceanologica Acta*, 2001. V. 24. P. 557–568.
- Hardman-Mountford N.J., Richardson A.J., Agenbag J.J., Hagen E., Nykjaer L., Shillington F.A., Villacastin C. Ocean climate of the South East Atlantic observed from satellite data and wind models. *Prog Oceanogr.* 2003. V. 59. P. 181–221.
- Lomakin P.D. Upwelling in the Kerch strait and the adjacent waters of the Black sea based on the contact and satellite data // *Physical Oceanography*. 2018. V. 25. № 2.
- Lamont T. et al. Upwelling indices for comparative ecosystem studies: Variability in the Benguela Upwelling System // *J. Marine Systems*. 2018. V. 188. P. 3–16.
- Lutz K., Jacobeit J., Rathmann J. Atlantic warm and cold-water events and impact on African west coast precipitation. *International J. Climatology*. 2015. V. 35. № 1. P. 128–141.
- Nixon S., Thomas A. On the size of the Peru upwelling ecosystem // *Deep Sea Research. Part I. Oceanographic Research Papers*. 2001. V. 48. № 11. P. 2521–2528.
- Pachauri R.K. et al. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Ipcc*, 2014. P. 151.
- Polonskii A.B., Serebrennikov A.N. Ob izmenenii temperatury poverkhnosti okeana v zone Bengel'skogo apvellinga. Chast' 1: sezonnyi tsikl // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2019. № 3. P. 33–44.
- Polonskii A.B., Serebrennikov A.N. Ob izmenenii temperatury poverkhnosti okeana v zone bengel'skogo apvellinga. Chast' 2: mnogoletnie tendentsii // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2019. № 4. P. 29–39.
- Reynolds R.W. et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature // *J. Climate*. 2007. V. 20. № 22. P. 5473–5496.
- Rouault M., Florenchie P., Fauchereau N., Reason C.J.C., South East Tropical Atlantic Warm Events and Southern African Rainfall, *Geophys. Res. Lett.*, 2003. V. 30. № 5.
- Strub P.T., Shillington F.A., James C., Weeks S. Satellite comparison of the seasonal circulation in the Benguela and California current systems. *South African J. Marine Science*. 1998. V. 19. P. 99–112.
- Tim N., Zorita E., Hünicke B. Decadal variability and trends of the Benguela upwelling system as simulated in a high-resolution ocean simulation. *Ocean Sci.* 2015. V. 11. P. 483–502.
- Vizy E. K., Cook K. H. Mesoscale convective systems and nocturnal rainfall over the West African Sahel: role of the Inter-tropical front // *Climate dynamics*. 2018. V. 50. № 1–2. P. 587–614.
- Veitch J.A., Penven P. The role of the Agulhas in the Benguela Current system: A numerical modeling approach // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2017. V. 122. № 4. P. 3375–3393.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

**СПУТНИКОВАЯ ОЦЕНКА НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ
СРЕДЫ В РАЙОНЕ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ ИСКИТИМА
В 2013–2020 ГОДАХ**

© 2022 г. Н. В. Родионова*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,
Фрязино, Московская обл., Россия***E-mail: rnv@ire.rssi.ru*

Поступила в редакцию 14.07.2021 г.

В статье рассматривается использование мультиспектральных данных спутников Landsat 8, Sentinel 2, Aqua и Terra для мониторинга окружающей среды в районах открытых угольных разрезов в Искитимском районе Новосибирской области за период 2013–2020 гг. Показана динамика изменения значений коэффициента отражения (КО) от поверхности и водных объектов, снежного индекса NDSI в период таяния снега, изменение NDVI в летнее время. Показана динамика изменения аэрозольной оптической толщи (АОТ), значений CO и CH₄ в атмосфере Искитимского района с использованием системы анализа и визуализации данных Giovanni. Спутниковая оценка состояния атмосферы выявила сезонные изменения аэрозольной оптической толщи с максимальными значениями в апреле и июле. Показано, что самые высокие концентрации угарного газа в атмосфере наблюдаются в зимние месяцы, а также в весенние месяцы март и апрель. Показано стабильное уменьшение концентрации угарного газа в атмосфере за 7 лет с 2014 по 2020 г. с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.95$ и увеличение концентрации метана с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.89$.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мультиспектральные данные, коэффициент отражения, угольные разрезы, загрязнение поверхности и атмосферы

DOI: 10.31857/S0205961422020087

ВВЕДЕНИЕ

Добыча угля открытым способом, его перегрузка и транспортировка оказывают негативное влияние на окружающую среду, загрязняя поверхность и воздух выбросами твердых веществ в виде угольной и неорганической пыли, угольной золы и сажи. Более активная добыча угля является причиной техногенных землетрясений из-за перемещения горных пород (<https://ngs.ru/text/gorod/2020/09/28/69479455/>). За последние 10 лет частота землетрясений в Новосибирской области возросла, это напрямую связано с активной добычей угля. Одно из последних землетрясений произошло в сентябре 2020 г. в окрестности Колыванского угольного разреза (УР) близ села Усть-Чем.

Спутниковые снимки позволяют оценить площадь и степень загрязнения территорий, прилегающих к угледобывающим предприятиям, в основном, это касается периода снеготаяния.

В данной работе проведен спутниковый мониторинг загрязнения снежного покрова в Искитимском районе Новосибирской области вблизи Колыванского и Восточного УР и в окрестностях

Новосибирского электродного завода в поселке Линево с использованием мультиспектральных данных со спутников Landsat 8 (L8) и Sentinel 2 (S2) с целью определения динамики изменения значений КО от поверхности, индекса снега NDSI в период снеготаяния и вегетационного индекса NDVI в летнее время за период 2013–2020 гг. В работе также проводится оценка загрязнения атмосферы на основе использования данных спутников Terra/Aqua. Рассматривается сезонная и межгодовая изменчивость значений АОТ, CO и CH₄ в Искитимском районе с использованием системы анализа и визуализации данных Giovanni (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>).

**ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РАЙОН
ИССЛЕДОВАНИЯ**

В качестве исходных используются снимки Landsat 8 OLI C2 L2 с радиометрической калибровкой и атмосферной коррекцией, бесплатный доступ к которым можно получить, к примеру, посредством сервиса EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Используемые каналы (B2–B7) каждого снимка были преобразованы из значе-

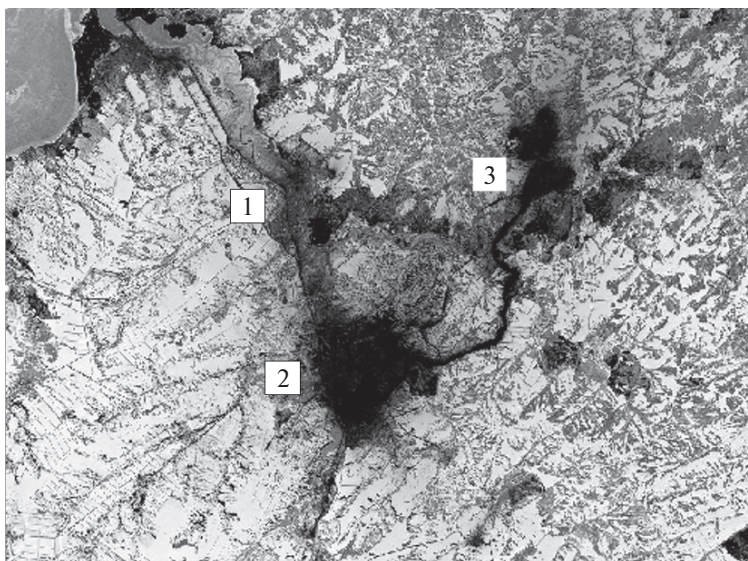


Рис. 1. S2 изображение Искитимского района, канал В4, дата 02.04.2020.

ний яркости DN в значения отражательной способности подстилающей поверхности. Пространственное разрешение для мультиспектральных каналов составляет 30 м. Использованы безоблачные снимки начала апреля (таяние снега) и лета (июль—август) 2013—2020 гг.

В работе также использованы мультиспектральные данные Sentinel 2 с высоким временным, пространственным и спектральным разрешением. В мультиспектральной камере 13 каналов с разным пространственным разрешением от 10 до 60 м. Использовались данные съемочной системы S2 с уровнем обработки L2A в виде альbedo на нижней границе атмосферы (с атмосферной коррекцией). Обработка данных S2 осуществлялась с помощью программы SNAP (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>). Снимки S2 использовались в случаях, когда отсутствовали или были покрыты облаками снимки L8.

Для анализа загрязнения атмосферы использовался онлайн-инструмент визуализации и анализа данных НАСА Годдарда Giovanni (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>), позволяющий делать сравнение и анализ больших объемов данных дистанционного зондирования (ДЗ) (NASA MODIS (Terra и Aqua), ESA MERIS (ENVISAT)) без пользовательской загрузки.

Территория исследования расположена в Искитимском районе Новосибирской области (Восточная Сибирь). Искитимский район — территория с высокой техногенной нагрузкой. Есть несколько угольных бассейнов с открытой добычей угля, цементный завод (Искитим), Новосибирский электродный завод (поселок Линево), сырьевой базой для которого являются месторождения антрацита. Все это, а также все процессы,

связанные с эксплуатацией угольных шахт, транспортировкой угля, приводит к негативным последствиям для природной среды.

На рис. 1 показана область исследования на снимке S2, канал В4, дата съемки 02.04.2020, с характерным видом загрязнения снежного покрова в районе Искитима (1), Линево (2), Колыванского и Восточного УР (3), Ургунского, Горловского УР и автомобильных дорог, по которым транспортируется уголь. В верхней левой части снимка виден фрагмент Обского водохранилища.

СПУТНИКОВАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В работе (Purkis, Klemas, 2011) показано, что минимальный временной интервал для изучения техногенного воздействия добычи полезных ископаемых на окружающую среду составляет 5 лет.

Мониторинг снежного покрова в период снеготаяния

Для оценки уровня загрязнения поверхности в зимне—весенний период используется оценка загрязнения снежного покрова в период снеготаяния. Снежный покров, обладающий кумулятивным эффектом, позволяет получить реальную суммарную величину выпадений загрязняющих веществ (ЗВ). Критерием оценки являются отражательные характеристики снежного покрова в различных спектральных каналах и индексы снега, одним из которых является индекс NDSI (нормализованный разностный индекс снега) (Hall et al., 1995), определяемый как $NDSI = (GREEN - SWIR1)/(GREEN + SWIR1)$.

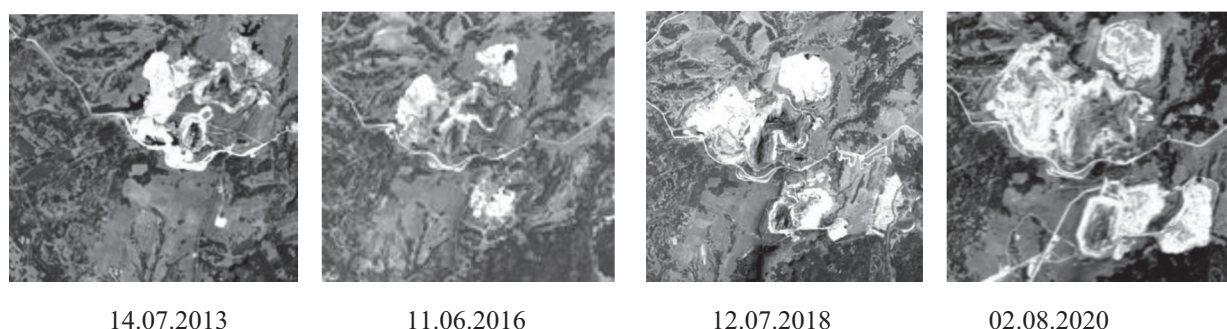


Рис. 2. Динамика изменения территорий Колыванского и Восточного УР с 2013 по 2020 годы по данным L8.

Порогом для идентификации снега является значение $NDSI \geq 0.4$ (Hall et al., 1995).

Сравним коэффициент отражения (КО) от снежного покрова и значения NDSI вблизи Колыванского УР (рис. 1, (3)) и п. Линево (рис. 1, (2)) в 2013 и 2020 гг.

Территория угольных шахт в районе Колыванского УР увеличилось с 2013 по 2020 г. (рис. 2).

На рис. 3 показаны графики изменения коэффициента отражения и значения NDSI вдоль профиля в районе Колыванского и Восточного УР в период снеготаяния за 09.04.2013 (L8) (рис. 3, верхний ряд) и 02.04.2020 (S2) (рис. 3, нижний ряд). Профиль состоит из 14 точек. По оси абсцисс отложено расстояние в км от “нулевой точки” (значение 0 км соответствует точке с координатами $54^{\circ}39'47''$ N, $83^{\circ}37'30''$ E, вблизи дороги к УР). Значение NDSI для всех точек профиля 2013 года больше 0.5, т.е. в этих точках идентифицирован снег. Для 2020 года снег не идентифицирован для точек профиля до 2.5 км в направлении к Усть-Чему (от 0 точки) и порядка 1.2 км (от 0 точки) в западном направлении.

Загрязнение снега в районе поселка Линево связано с работой Новосибирского электродного завода (НЭЗ). Выносы пыли от высотных труб НЭЗ, производств по переработке угля, карьерных работ, технологической трассы в окрестностях НЭЗ являются основными источниками загрязнения в районе п. Линево. На рис. 4 приведены графики изменений КО и NDSI за 9 апреля 2013 г. (L8) ((верхний ряд) и 2 апреля 2020 г. (S2) (нижний ряд) вдоль профиля из 8 точек, проходящего через Линево. По оси абсцисс отложено расстояние в км от “нулевого километра” (значение 0 км соответствует точке с координатами $54^{\circ}31'15''$ N, $83^{\circ}24'05''$ E, вблизи НЭЗ). Зона отсутствия снега в 2020 г. относительно 2013 г. практически не изменилась в направлении на запад от 0 точки, в то же время расширилась в восточном направлении на 4–5 км.

Мониторинг изменений NDVI

Для оценки состояния растительности используются интегральные характеристики, выраженные в виде вегетационных индексов (ВИ). Основой для выбора ВИ является особенность кривых отражательной способности растительности, а именно, в красной области спектра (RED) отмечается максимум поглощения солнечного излучения хлорофиллом, в ближней инфракрасной (NIR) максимум отражения энергии клеточной структурой листа. В результате для количественной оценки плотности фитомассы наиболее распространено использование нормализованного разностного индекса $NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$.

Техногенные факторы, связанные с открытым способом угледобычи, оказывают негативное влияние на растительный покров. Загрязнения атмосферы, почвы, водной среды и др. являются факторами нарушения роста и развития растительности.

В данной работе проведено сравнение значений КО и NDVI для профиля в п. Линево по данным L8 для летнего периода времени для дат 30.07.2013 и 02.08.2020 (профиль тот же, что и рис. 4).

Отметим на рис. 5 локальный минимум значений КО в точке “нулевого” км (вблизи НЭЗ). Значения NDVI для всех точек профиля, кроме точки 9.2 км, для 2013 г. превосходят значения NDVI для 2020 г.

На рис. 6 показаны RGB изображения исследуемой территории для летнего периода, демонстрирующие динамику изменений значений NDVI = $(B5 - B4)/(B5 + B4)$ (каналы L8). Даты съемки 30.07.2013, 04.08.2018 и 02.08.2020 со следующей кодировкой значений NDVI: красный цвет – $NDVI < 0.4$, зеленый цвет – $NDVI > 0.7$, синий цвет – $(NDVI \geq 0.4)$ and $(NDVI \leq 0.7)$. Прослеживается тенденция с 2013 по 2020 г. увеличения территорий со значениями $NDVI < 0.7$.

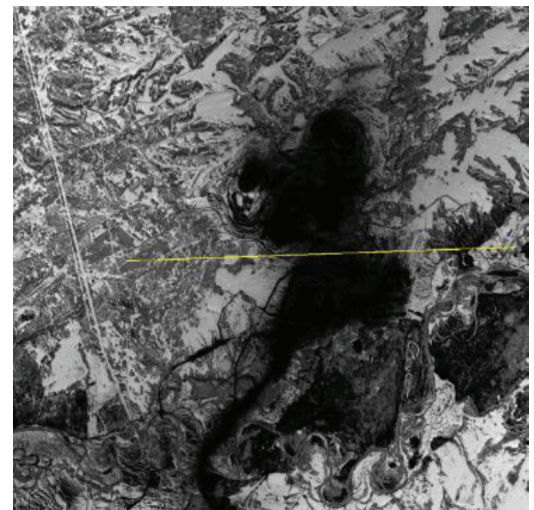
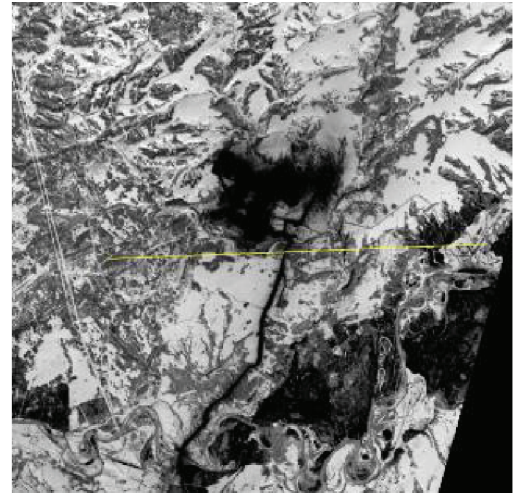
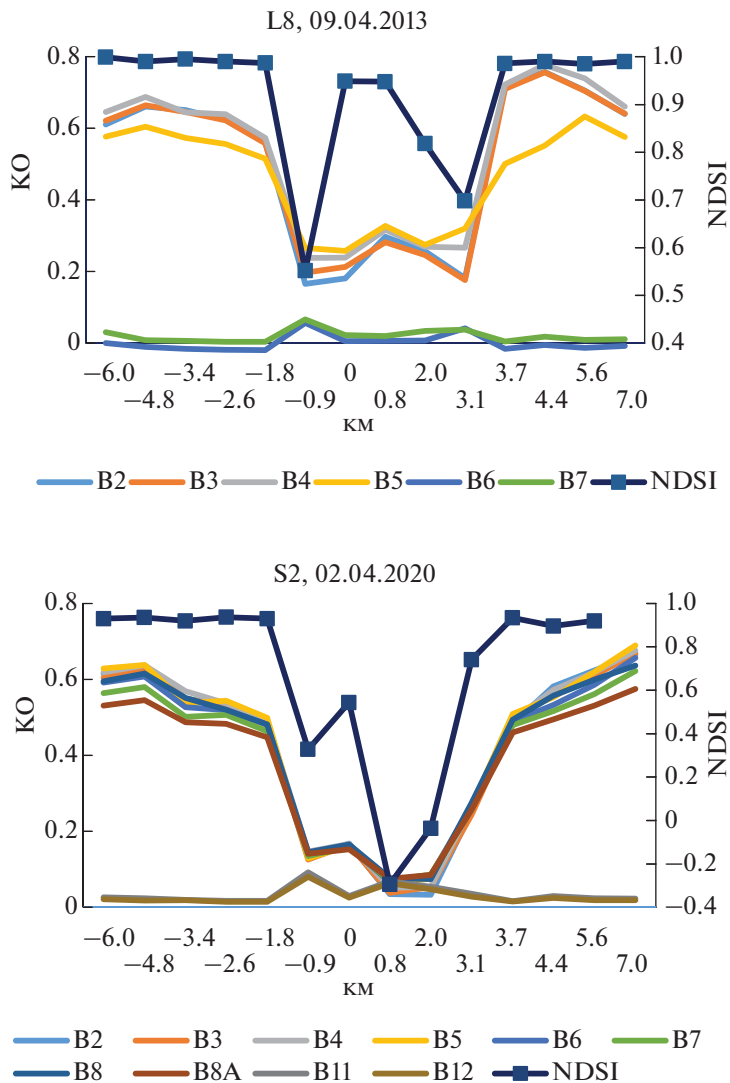


Рис. 3. Графики изменения КО и NDSI для профиля в районе Колыванского и Восточного УР для апреля 2013 и 2020 гг.

Мониторинг изменений коэффициента отражения от водных объектов

На рис. 7 показано изображение Landsat 8 (B5, 2.8.2020), на котором цифрами отмечены водные объекты, являющиеся предметом мониторинга в данной работе: Обское водохранилище – цифра 1, река Бердь у моста –2, река Бердь–3, озеро Линево–4, озеро Койниха–5. Спектральные кривые для длин волн каналов B2–B7 показаны на рисунке 8 для четырех дат 30.07.2013, 08.07.2014, 31.07.2019, 02.08.2020.

В работе (Опарин и др., 2014) показано, что две спектральные зоны NIR и SWIR очень чувствительны к присутствию примесей в водной среде. В закрытых водоемах (озеро Линево) такие примеси оседают на дно, в то время как для водоемов с активным течением воды частицы перемешива-

ются, что вызывает скачок значений КО. Кроме того, присутствие взвешенных частиц в водной среде увеличивает КО в спектре NIR, а органических веществ в SWIR1. На графиках рис. 8 для 2013 г. наблюдаем два пика значений КО: в зеленой области спектра B3 и в NIR (B5). Первый максимум присутствует на графиках и для других дат. Увеличение КО в канале B3 связано с увеличением объема фитопланктона. Уменьшение КО в красной зоне спектра связано с поглощением хлорофилла планктоном и, следовательно, уменьшением КО в канале B4. Наименьшие вариации в каналах B2–B7 характерны для объекта 4–озеро Линево (за исключением 2013 г.). Второй максимум (канал B5) связан с наличием взвешенных примесей в водной среде. В 2013 г. значение КО для B5 в три и более раз превышает

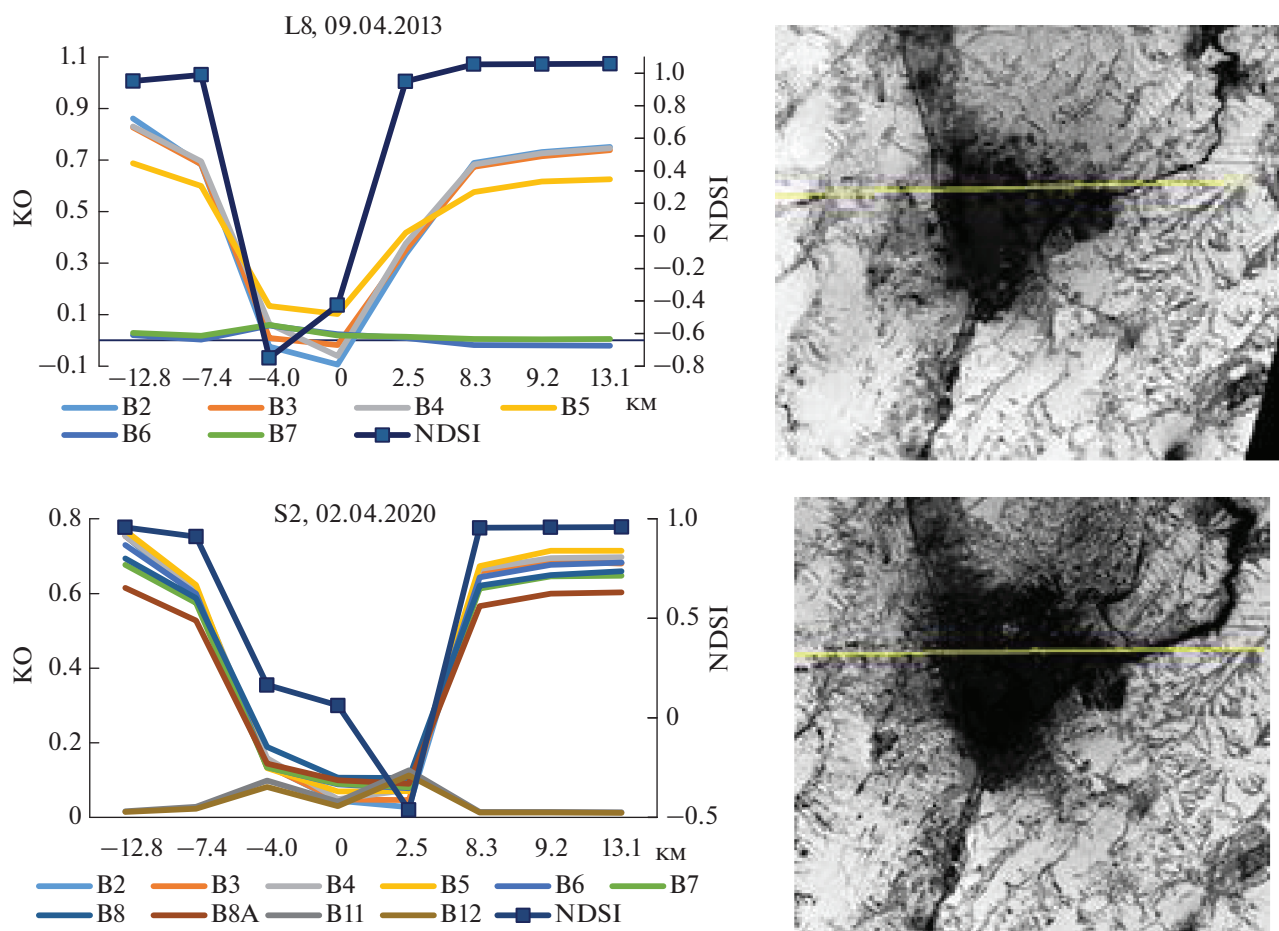


Рис. 4. Графики изменения КО и NDSI для профиля в районе поселка Линево для апреля 2013 и 2020 гг.

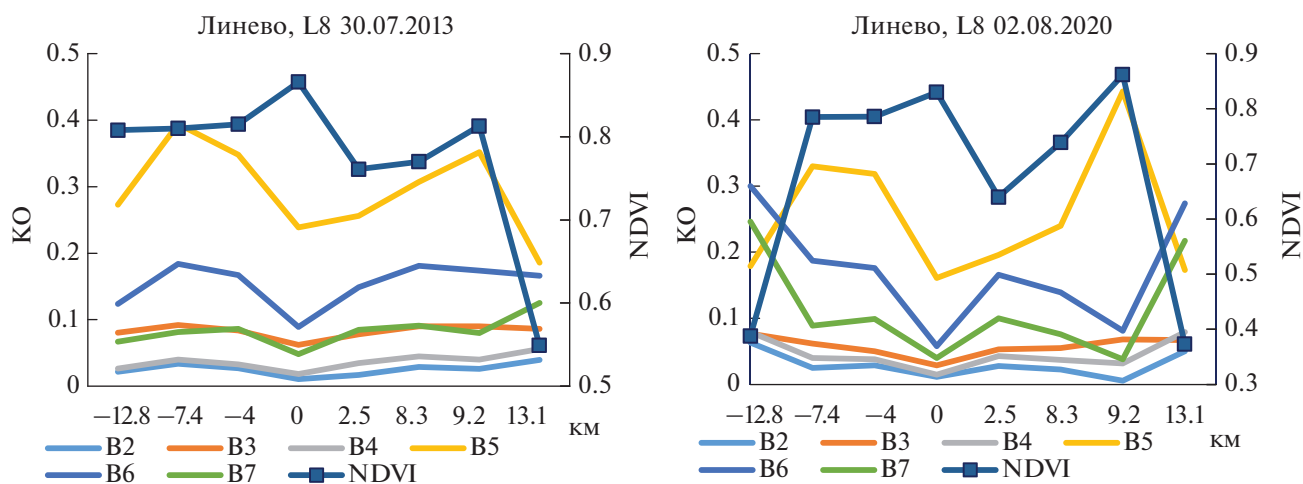


Рис. 5. Графики изменений КО и NDVI для профиля в п. Линево по данным L8.

значение КО для 2014–2020 гг. Исключением является значение КО для Обского водохранилища, для которого значения КО в канале В5 являются наименьшими в сравнении с другими водными

объектами. Второй максимум, ярко выраженный в 2013 г., постепенно сходит на нет с 2014 г., и значения КО постепенно снижаются при переходе от канала В5 к каналу В7.

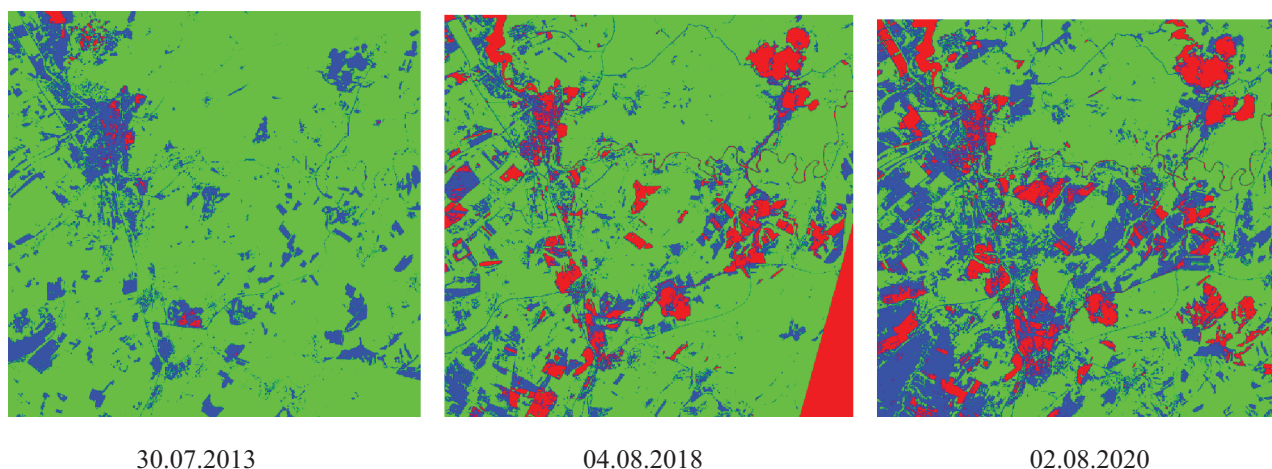


Рис. 6. RGB карты значений NDVI за 30.07.2013, 04.08.2018 и 02.08.2020.

Спутниковая оценка состояния атмосферы

Искитим входит в число городов с высоким уровнем загрязнения атмосферы (ЗА). Веществами, определяющими уровень ЗА в Искитиме, являются бенз(а)пирен, взвешенные вещества (пыль), СО-оксид углерода, NO_2/NO – диоксид/оксид азота, SO_2 – диоксид серы, сероводород и сажа. Искитим расположен в низине, что способствует скоплению в воздухе над городом вредных веществ.

В данной работе рассматривается динамика изменений за 2013–2020 гг. аэрозольной оптической толщи (АОТ), значений СО и CH_4 в Искитимском районе с помощью системы анализа и

визуализации данных Giovanni (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>).

Сезонные и межгодовые вариации АОТ атмосферы. Среди радиационно-значимых компонентов атмосферы, наряду с парниковыми газами и облаками, важную роль играет атмосферный аэрозоль, основной оптической характеристикой которого является АОТ атмосферы. Аэрозольные частицы оказывают значительное влияние на температурный баланс атмосферы, поскольку они способны поглощать, рассеивать, отражать солнечное излучение и инициировать процессы образования облаков. Основными природными факторами, влияющими на долгосрочную изменчивость АОТ, являются извержения вулканов (Bryson, Goodman, 1980) и лесные пожары (Сакерин и др., 2008). При добыче угля открытым способом основными загрязнителями являются твердые выбросы: неорганическая пыль, угольная пыль, угольная зола и сажа. Для анализа пространственно-временных вариаций АОТ все чаще используются данные спутниковых измерений, в частности радиометра MODIS спутников Terra/Aqua.

Для оценки вариаций атмосферного аэрозоля были использованы данные уровня 3 (среднесуточные) коллекции 6.1 радиометра MODIS (ИСЗ Terra) – продукт Terra MOD08_D3 v6.1 (Deep Blue, Land only), на длине волны 550 нм. Данные АОТ, полученные с помощью MODIS, представляют собой двумерное поле (изображение), интегрированное по высоте. Размеры отдельных элементов (пикселей) карты составляют $1^\circ \times 1^\circ$ (широта \times долгота). Были рассчитаны среднемесячные значения АОТ за период апрель–октябрь 2013–2020 гг., усредненные для области $1^\circ \times 1^\circ$ с координатами центра 54.5° N , 83.5° E , с использованием системы анализа и визуализации данных Giovanni.

На рис. 9 показан сезонный ход значений АОТ за апрель–октябрь 2013–2020 и СКО АОТ.

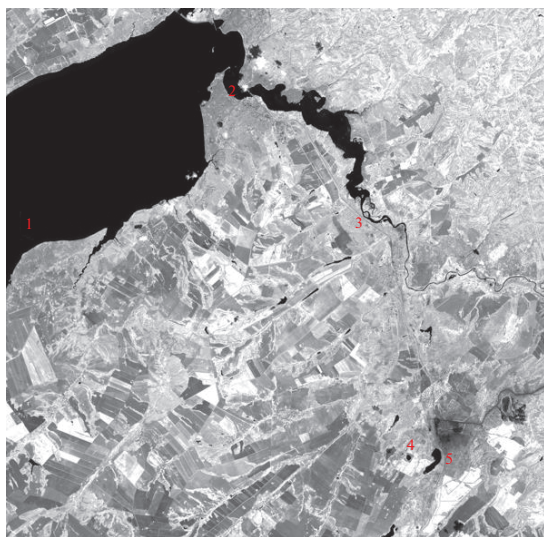


Рис. 7. Рассматриваемые водные объекты на снимке L8, дата съемки 02.08.2020: 1 – Обское водохранилище, 2 – река Бердь у моста, 3 – река Бердь, 4 – озеро Линево, 5 – озеро Койниха L8, канал В5, 02.08.2020.

L8, канал B5, 02.08.2020

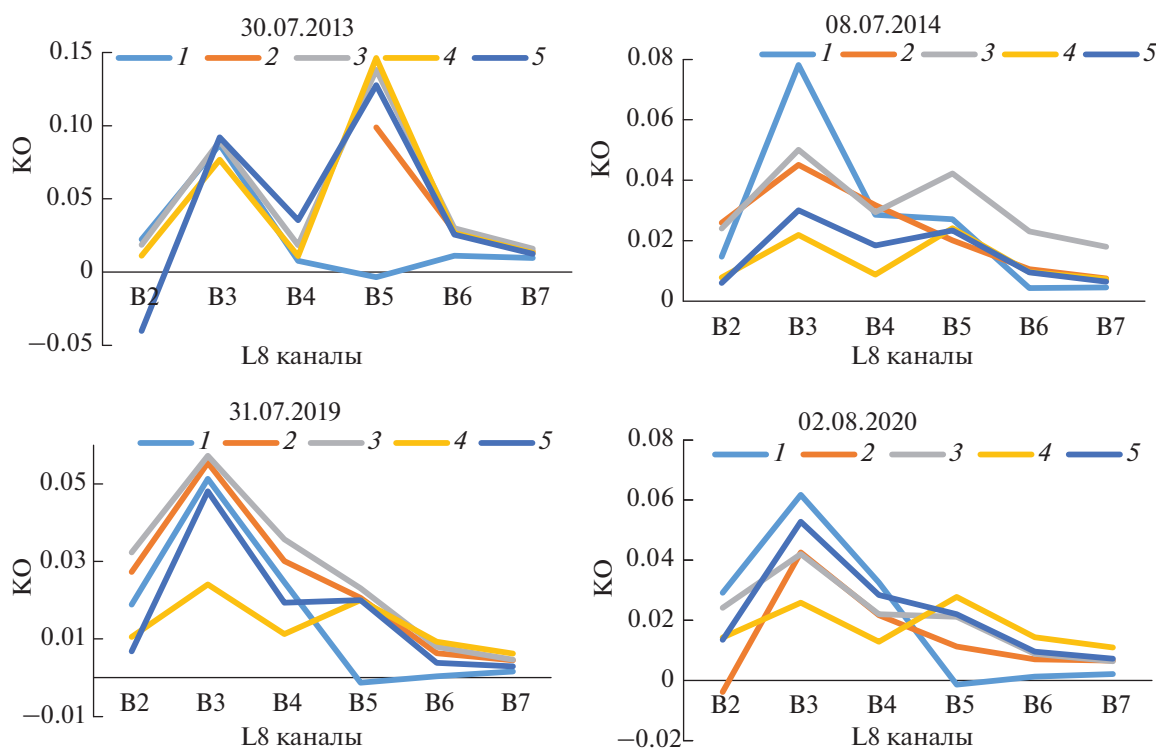


Рис. 8. Спектральные кривые для водных объектов: 1 – Обское водохранилище, 2 – река Бердь у моста, 3 – река Бердь, 4 – озеро Линево, 5 – озеро Койниха.

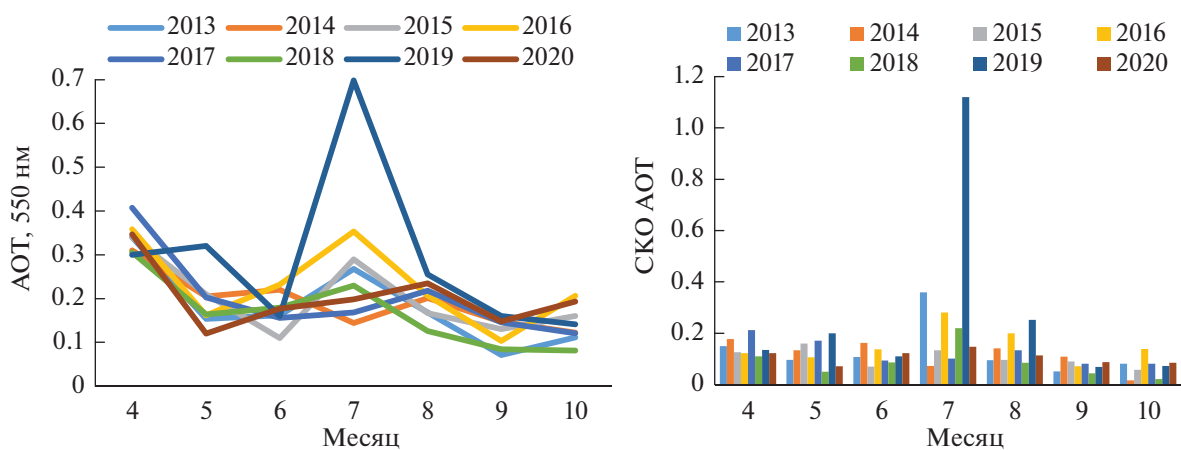


Рис. 9. Средние значения АОТ и СКО АОТ за апрель–октябрь 2013–2020 гг. для исследуемой области по данным MODIS (Terra).

Отмечаем сезонный ход АОТ с максимумом в весенне–летний период (апрель и июль) и минимумом осенью (данные за зимний период отсутствуют). Аналогичные тенденции наблюдаются и для Байкальского региона (Тацилин и др., 2021). В июле рост значений АОТ был наиболее заметен в 2019 г. Следует также отметить значительный

разброс значений АОТ в июле 2019 года. Одной из основных причин апрельского максимума АОТ в районе Искитима является выброс при таянии снега аэрозоля, накопленного в зимний период в снежном покрове. Локальный минимум в мае может быть связан с образованием свежего растительного покрова и увеличением уровня осадков,

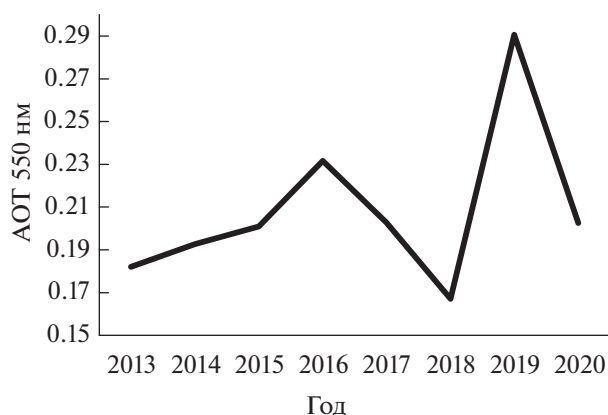


Рис. 10. Межгодовые вариации АОТ за период 2013–2020.

которые вымывают аэрозоль. Максимум АОТ в июле, скорее всего, связан с повышением температуры, снижением влажности и засухой.

На рис. 10 показан график межгодовых вариаций АОТ за период 2013–2020. Годового тренда не обнаружено. Наблюдаются большие колебания межгодовых значений АОТ. Для 2018 года среднегодовое значение АОТ близко к среднегодовому глобальному значению 0.16, полученному по спутниковым данным MODIS, TOMS, AVHRR (Chubanova et al., 2012). Для остальных дат для Искитимского региона среднегодовые значения АОТ значительно превышают среднегодовое глобальное значение и значение для Байкальского региона (данные MODIS и наземных измерений солнечных фотометров, (Тащилин и др., 2021)).

Сезонные и межгодовые вариации СО. Основными источниками СО являются сжигание ископаемого топлива, биомассы и атмосферное окисление метана и других углеводородов. Оксид углерода — это газ без цвета и запаха. СО образуется при сгорании органических видов топлива (древесины, угля, бумаги, масел, бензина и т.д.). Преобладающая часть (~90%) атмосферного СО образуется в результате природных процессов (вулканические и болотные газы, лесные и степные пожары, жизнедеятельность земной и океанической флоры и фауны). В то же время около 70% СО в атмосфере является продуктом окисления метана в тропосфере с участием радикала гидроксила (ОН). В глобальном масштабе именно атмосферный метан (который окисляется ОН) является основным источником СО в атмосфере. В крупных городах и промышленных регионах перевес может быть на стороне СО, непосредственно выбрасываемого из антропогенных источников. Сотни миллионов тонн СО ежегодно попадают в атмосферу в результате деятельности человека: автотранспорта, железнодорожного и морского транспорта; неисправности газопроводов и газового оборудования; металлургии, хими-

ческой промышленности, добычи угля, производства табака, хлеба, легкой промышленности; переработки отходов; сжигания топлива в быту. В промышленности СО образуется в результате неполного окисления природного газа или газификации угля и кокса. СО попадает в атмосферный воздух при любом типе горения. В городах СО попадает в воздух, главным образом, в составе выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания. СО имеет продолжительное время жизни — около месяца (Дерюгина, 2017).

Для исследования вариаций содержания СО в атмосфере использовались ежедневные (дневные) данные продукта AIRS/Aqua (продукт AIRS3STM v006), усредненные по области 54°–55°, 83°–84° Е. На рис. 11, а показаны среднемесячные значения концентрации СО, а на рис. 11, б значения СКО СО за период 2013–2020 годов. Характерным в поведении графиков для всех 8 лет с 2013 по 2020 г. является: 1) самые высокие концентрации СО в зимние месяцы, а также в весенние месяцы март и апрель, 2) самые низкие концентрации СО в летние месяцы.

На рис. 12 показаны среднегодовые концентрации СО за 2014–2020 гг. Усреднение проводилось за 11 мес. (не вошел июль месяц из-за отсутствия данных за 2013–2018 гг.). В график не вошли данные за 2013 г., поскольку, помимо июля, для этого года нет данных за май. Линия тренда с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.95$ указывает на стабильное снижение концентрации СО в течение 7 лет с 2014 по 2020 г. В 2014 г. среднегодовая концентрация СО составляла $0.145 \text{ ppm} = 0.168 \text{ mg m}^{-3}$. Среднегодовое значение на 2020 г. составляет $0.136 \text{ ppm} = 0.158 \text{ mg m}^{-3}$. Среднесуточная ПДК (предельно допустимая концентрация) СО равняется ПДК_{сс} = 0.05 mg m^{-3} , а максимальная разовая ПДК_{мр} = 0.15 mg m^{-3} (<https://vozdyx.ru/article/pdk-vrednyx-veshhestv-v-atmosfernom-vozduxe/>).

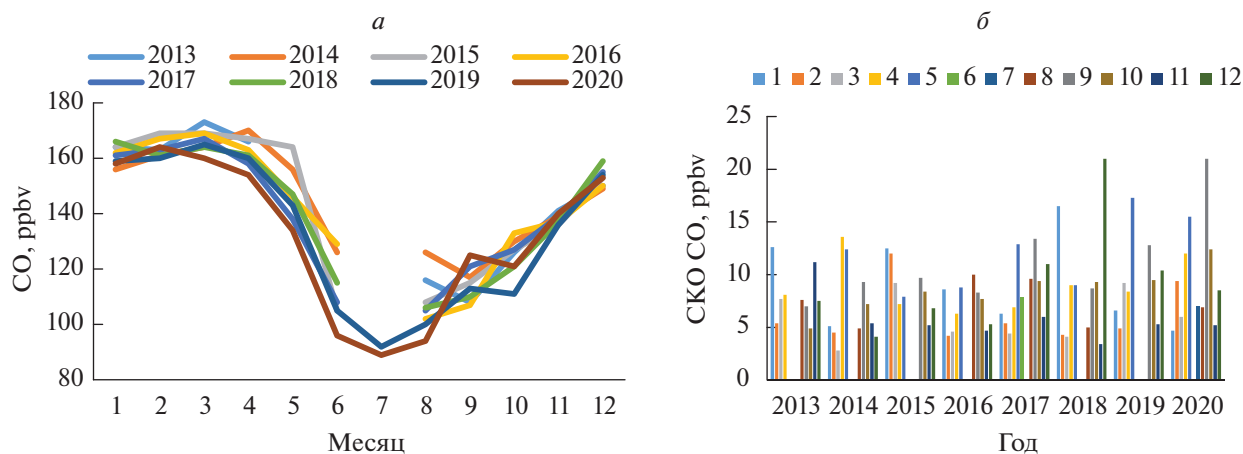


Рис. 11. Среднемесячные изменения концентрации угарного газа, усредненные для области 54° – 55° N, 83° – 84° E.

Сезонные и межгодовые вариации CH_4 . Метан попадает в атмосферу в результате как природных, так и антропогенных процессов. Основным естественным источником выбросов метана в атмосферу являются водно-болотные угодья. Метан образуется в основном в результате деятельности бактерий, участвующих в разложении органического вещества. Поэтому основными местами образования метана являются болота, мусорные свалки и т.д. Кроме того, метан выделяется через трещины в земной коре на дне водоемов, при добыче полезных ископаемых и при сжигании лесов. Антропогенными источниками метана в атмосфере являются производство энергии из угля и природного газа, свалки, очистные сооружения, сельское хозяйство (переработка навоза), рисоводство и сжигание биомассы. Метан выделяется в процессе производства и транспортировки угля, природного газа и нефти. После выброса метан остается в атмосфере примерно 10 лет, после чего он удаляется в основном путем химического окисления в тропосфере. Основным

механизмом удаления метана из атмосферы является его окисление в верхних слоях атмосферы гидроксильным радикалом OH, который образуется под воздействием солнечного света из озона и водяного пара.

На рис. 13 показаны графики сезонных и межгодовых вариаций значений концентрации CH_4 по среднемесячным (дневным) данным инфракрасного спектрометра AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), установленного на спутнике EOS AQUA (продукт AIRS3STM v.7.0). Это карты распределений метана с разрешением $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ на барической высоте 1000 гПа, доступные по ссылке (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>). В продукте есть пропуск данных для июля месяца.

Согласно рис. 13, локальные максимумы концентрации метана наблюдались в марте, августе и октябре. Спад значений отмечен в апреле–мае и в зимние месяцы. Среднее значение СКО равно порядка 31 ppb. Известно, что средняя концентрация CH_4 в атмосфере составляет 1.86 ppm (Репи-

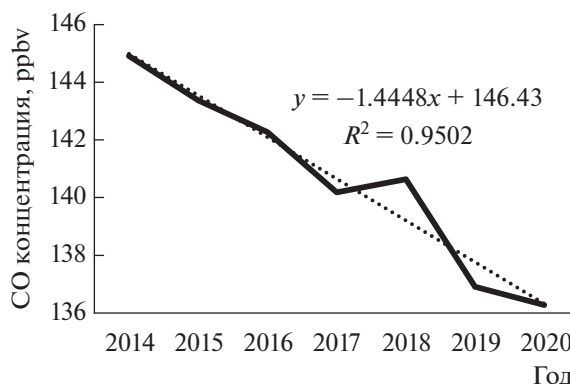


Рис. 12. Среднегодовые значения концентрации CO за 2014–2020 с линией тренда.

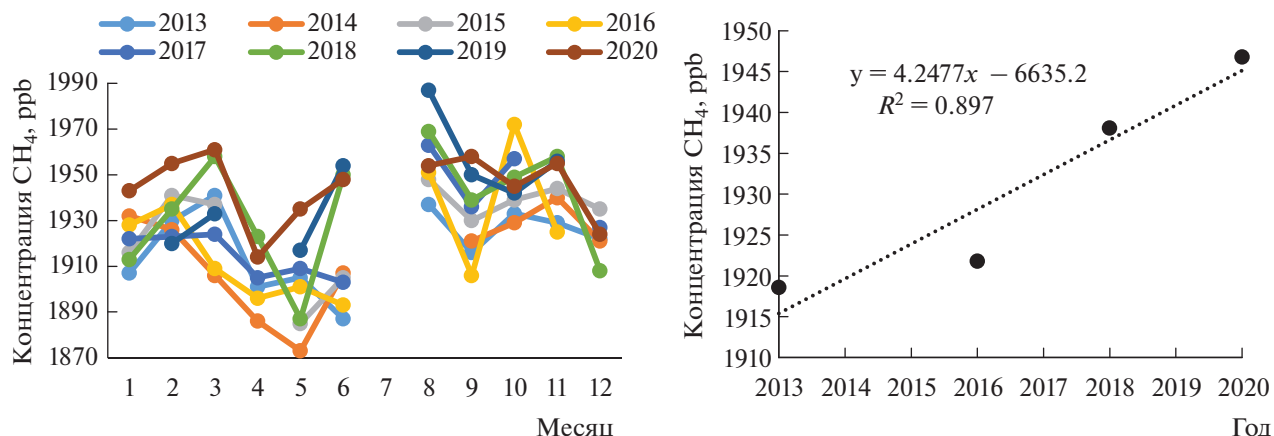


Рис. 13. Сезонные и межгодовые вариации концентрации метана для 2013–2020 гг.

на, 2015). Концентрация метана над исследуемой территорией превышает среднее значение для атмосферы. График межгодовых значений концентрации CH₄ построен при усреднении значений за 10 мес. (январь–июнь, август–ноябрь). Линия тренда с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.89$ указывает на устойчивый рост концентрации метана за период 2013–2020.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным спутникового мониторинга Искитимского района с высокой техногенной нагрузкой за период 2013–2020 гг. в экологии региона намечились следующие изменения. Зона грязного снега расширилась на восток на 3–5 км в районе Линево и в районе Колыванского и Восточного УР за отмеченный период. Показана динамика снижения значений вегетационного индекса NDVI. Показано сезонное изменение АОТ с максимальными значениями в апреле и июле. В 2018 г. среднее значение АОТ близко к среднегодовому глобальному значению 0.16. Для остальных дат для Искитимского региона среднегодовое значение АОТ значительно превышает среднегодовое глобальное значение. Показано, что самые высокие концентрации угарного газа в атмосфере наблюдаются в зимние месяцы, а также в весенние месяцы март и апрель. Летние месяцы характеризуются самыми низкими концентрациями СО. Показано стабильное уменьшение концентрации угарного газа в атмосфере за 7 лет с 2014 по 2020 г. с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.95$ и увеличение концентрации метана с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.89$.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по теме 0030-2019-0008 “Космос”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дерюгина А.Б. Анализ локальных измерений концентрации СО в г. Петергоф. 2017. [rid_8cfe04d7c0304f5587627e49f20d451a.PDF](https://www.rshu.ru/rid_8cfe04d7c0304f5587627e49f20d451a.PDF) (rshu.ru).
- Опарин В.Н., Потапов В.П., Гиниятуллина О.Л. О комплексной оценке состояния окружающей среды по данным дистанционного зондирования Земли в регионах с высокой техногенной нагрузкой // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 6. С. 199–209.
- Репина И. Дистанционные исследования концентраций и потоков метана в атмосфере. http://d33.info-space.ru/d33_conf/tarusa2015/07.pdf.
- Сакерин С.М., Горбаренко Е.В., Кабанов Д.М. Особенности многолетней изменчивости аэрозольной оптической толщины атмосферы и оценки влияния различных факторов // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 7. С. 625–631.
- Тащилин М.А., Яковлева И.П., Сакерин С.М. Пространственно-временные вариации аэрозольной оптической толщины в Байкальском регионе // Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 219–226.
- Bryson R.A., Goodman B.M. Volcanic activity and climatic changes // Science. 1980. V. 207. P. 1041–1044.
- Chubarova N., Nezval Ye., Sviridenkov M., Smirnov A., Slutsker I. Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010 // Atmospheric Measurement Techniques. 2012. V. 5. P. 557–568.
- Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data // Remote Sens. Environ. 1995. V. 54(2). P. 127–140.
- Purkis S., Klemas V. Remote sensing and global environmental change. UK, USA: Wiley-Blackwell, 2011.

Satellite Assessment of Some Environmental Parameters in the Area of the Iskitim Coal Mines in 2013–2020

N. V. Rodionova

Institute of Radioengineering and Electronics, RAS, Fryazino, Moscow Region, Russia

The article discusses the use of multispectral data from Landsat 8, Sentinel 2, Aqua and Terra satellites for environmental monitoring in the areas of open-pit coal mines in the Iskitim district of the Novosibirsk region for the period 2013–2020. The dynamics of changes in the values of the reflection coefficient from the surface and water bodies, the snow index NDSI during the snow melting period, and the change in NDVI in summer are shown. It is obtained the dynamics of changes in the aerosol optical thickness (AOT), CO and CH₄ values in the atmosphere of the Iskitim district using the Giovanni data analysis and visualization system. A satellite assessment of the state of the atmosphere revealed seasonal changes in the AOT with maximum values in April and July. It is shown that the highest concentrations of carbon monoxide in the atmosphere are observed in the winter months, as well as in the spring months of March and April. A stable trend of decreasing CO values in the atmosphere for 7 years from 2014 to 2020 with a determination coefficient of $R^2 = 0.95$ has been revealed. A stable trend of increasing in the concentration of methane in the atmosphere with a determination coefficient of $R^2 = 0.89$ is shown.

Keywords: remote sensing, multispectral images, coal mine, surface and air pollution

REFERENCES

- Bryson R.A., Goodman B.M. Volcanic activity and climatic changes // *Science*. 1980. V. 207. P. 1041–1044.
- Chubarova N., Nezval Ye., Sviridenkov M., Smirnov A., Slutsker I. Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010 // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2012. V. 5. P. 557–568.
- Deryugina A.B. Analiz lokal'nyh izmerenij koncentracii CO v g. Peterhof [Analysis of local measurements of CO concentration in Peterhof]. 2017. (In Russian) [rid_8cfe04d7c0304f5587627e49f20d451a.PDF](https://doi.org/10.26907/2541-7746.2017.01.008-014) (rshu.ru).
- Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data // *Remote Sens. Environ.* 1995. V. 54(2). P. 127–140.
- Oparin V.N., Potapov V.P., Giniyatullina O.L. O kompleksnoj ocenke sostoyaniya okruzhayushchej sredy po dannym distancionnogo zondirovaniya Zemli v regionah s vysokoj tekhnogennoj nagruzkoj [On a comprehensive assessment of the state of the environment according to remote sensing of the Earth in regions with high anthropogenic load] // *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopnyh*. 2014. № 6. P. 199–209. (In Russian)
- Purkis S., Klemas V. Remote sensing and global environmental change. UK, USA: Wiley-Blackwell, 2011. *Repina I.* Distancionnye issledovaniya koncentracij i potokov metana v atmosfere [Remote studies of methane concentrations and fluxes in the atmosphere]. (In Russian) http://d33.infospace.ru/d33_conf/tarusa2015/07.pdf.
- Sakerin S.M., Gorbarenko E.V., Kabanov D.M. Osobennosti mnogoletnej izmenchivosti aerol'noj opticheskoj tolshchiny atmosfery i oenki vliyaniya razlichnyh faktorov [Features of long-term variability of the aerosol optical thickness of the atmosphere and assessment of the influence of various factors] // *Optika atmosf. i okeana*. 2008. V. 21. № 7. P. 625–631. (In Russian)
- Tashchilin M.A., Yakovleva I.P., Sakerin S.M. Prostranstvenno-vremennye variacii aerol'noj opticheskoj tolshchi v Bajkal'skom regione [Spatio-temporal variations of the aerosol optical thickness in the Baikal region] // *Sovrem. probl. distanc. zondir. Zemli iz kosmosa*. 2021. V. 18. № 1. P. 219–226. (In Russian)

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**КОЭФФИЦИЕНТ ПОГЛОЩЕНИЯ ХОЛОДНОГО ОБЛАЧНОГО
АЭРОЗОЛЯ НА ЧАСТОТАХ 100–300 ГГц**© 2022 г. Г. С. Бордонский^а, *, А. О. Орлов^а^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт природных ресурсов,
экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

*E-mail: lgc255@mail.ru

Поступила в редакцию 30.04.2021 г.

Выполнены расчеты массового коэффициента поглощения в водном аэрозоле облачных образований при температурах 0...–50 °С на частотах 100...300 ГГц. При расчетах использована двухчастотная модель Дебая для диэлектрической проницаемости, в которой частоты релаксации переохлажденной воды были получены из новых экспериментов, выполненных в сантиметровом диапазоне. Из них одна частота релаксации принимает значения 10...1 ГГц, другая – 300...20 ГГц в указанном интервале температур. Выполнено сравнение расчетов с имеющимися экспериментальными данными других авторов до частоты 170 ГГц и температуры –30°С. Отмечен значительный разброс экспериментальных данных массового коэффициента поглощения и отсутствие удовлетворительных моделей для переохлажденной воды ниже –20°С. На основе выполненного исследования предполагается, что предложенные уточненные формулы для диэлектрической проницаемости позволяют определить массовый коэффициент поглощения до частот 200...300 ГГц.

Ключевые слова: переохлажденная вода, микроволновый диапазон, модели диэлектрической проницаемости, массовый коэффициент поглощения, водный аэрозоль

DOI: 10.31857/S0205961422020038

ВВЕДЕНИЕ

Использование в дистанционном зондировании частот 100...300 ГГц (G-диапазон) позволяет принципиально улучшить понимание процессов в облачных холодных образованиях – в граничных слоях облаков, в ледяных облаках, осадках в виде снега (Battaglia et al., 2014, Sharkov, 2003), а также улучшить пространственное разрешение пассивных систем в микроволновом диапазоне. Миллиметровые волны также интересны для спектроскопии атмосферы на линиях вращательного спектра молекул. Недавний пример – поиски следов жизни в атмосфере Венеры по линии фосфина (PH₃) на частоте 266.94 ГГц с помощью наземных радиометров (Greaves et al., 2020). Для эффективного решения такой задачи требуется знание передаточной функции земной атмосферы, вариации которой определяются содержанием водного аэрозоля.

Однако теоретические исследования переноса излучения в водном аэрозоле длительное время сдерживались отсутствием знаний о значениях комплексной диэлектрической проницаемости воды (ϵ). До недавнего времени имелось только несколько экспериментальных работ по определению ϵ при охлаждении воды до температуры не ниже –20°С (Башаринов, Кутуза, 1968, Bertolini

et al., 1982). В (Bertolini et al., 1982), например, на частоте 9.61 ГГц были измерены значения действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частей относительной диэлектрической проницаемости при охлаждении воды до –18°С, при этом охлаждение капель было достигнуто с использованием микроэмульсии. Результаты этих работ использовались для разработки различных моделей диэлектрической проницаемости, которые были распространены до частот ~500 ГГц (Liebe et al., 1991, Liebe et al., 1993, Ellison, 2007, Stogryn et al., 1995, Meissner, Wentz, 2004). По общему мнению, наиболее удачные модели использовали две частоты релаксации, что позволяло достичь удовлетворительного согласия в широком температурном от –20 до +70°С и частотном от 1 до 500 ГГц интервалах. Однако ясного физического обоснования использования двухчастотной модели не существует. Предполагают, что появление второго члена в формуле для ϵ связано с молекулярным взаимодействием в среде. При разработке этих моделей и их верификации использовали различные приемы, например, в (Башаринов, Кутуза, 1974) предложены измерения отношения коэффициентов поглощения на двух частотах. Натурный эксперимент весьма трудоемок, так как требует измерений не только поглощения на некоторой

трассе, но и определение концентрации воды, температуры и отсутствия ледяных частиц, искажающих результаты измерений коэффициента поглощения.

В недавней работе (Бордонский, Орлов, 2019) были измерены коэффициенты затухания (без учета рассеяния) на нескольких частотах от 10 до 180 ГГц. Охлаждение достигалось с использованием пористых силикатных сорбентов с пораами нанометровых размеров до температуры $\sim -70^\circ\text{C}$. При использовании данных о значениях ϵ' модели (Meissner, Wentz, 2004) в (Бордонский, Орлов, 2019) были найдены значения ϵ'' в частотном интервале до 200 ГГц при глубоком переохлаждении воды. Эту метастабильную поровую воду считали, на основании ряда исследований (Cervený et al., 2016, Меньшиков, Меньшиков, 2017), имеющей характеристики близкие к объемной воде. Вместе с тем, отсутствие измеренных значений ϵ' оставляло некоторый произвол в найденных значениях ϵ'' .

Этот недостаток был устранен в работе (Bordonskiy et al., 2020), где были выполнены измерения холодной воды, находящейся в порах силикатных сорбентов, в интервале температур $0...-70^\circ\text{C}$ на частотах 7.6 и 9.7 ГГц. Использовали метод измерений в резонаторе повышенного размера, что позволило выполнить усреднение по большому числу неоднородностей среды, вызванных миграцией влаги при охлаждении образцов (Бордонский, Орлов, 2019). Из независимо измеренных ϵ' и ϵ'' были найдены температурные зависимости двух частот релаксации в области глубокого переохлаждения воды, то есть в интервале $-20...-70^\circ\text{C}$. При этом за базовую модель диэлектрической проницаемости была принята модель из работы (Meissner, Wentz, 2004), в которой корректировались формулы для двух частот релаксации в области переохлаждения воды. В отличие от (Meissner, Wentz, 2004) в (Бордонский, Орлов, 2019) критическая температура, то есть температура замерзания воды при получении аналитических выражений из экспериментальных данных оказалась равной температуре стеклования (-130°C). Уточненная зависимость частот релаксации позволила распространить формулы для двухчастотной модели до частоты 200 ГГц, поскольку именно частоты релаксации определяют частотное поведение диэлектрической проницаемости. Сравнение результатов для ϵ'' из (Бордонский, Орлов, 2019) и новых вычислений (Bordonskiy et al., 2020) показало вполне удовлетворительное их соответствие. Однако в последней работе представлены более надежные данные об ϵ' , основанные на эксперименте, что открывает возможности расчетов переноса излучения в структурах, содержащих переохлажденную воду.

Цель настоящей работы – выполнить расчеты массового коэффициента поглощения в облачном аэрозоле на основе данных из (Bordonskiy et al., 2020) до частоты 300 ГГц при глубоком переохлаждении воды. Расчеты до более высокой частоты позволят в перспективе выполнить экспериментальную проверку справедливости формул для диэлектрической проницаемости в широкой области коротковолнового участка миллиметрового диапазона. Также рассмотрен вопрос об особенностях физики воды в области температур $+4...-70^\circ\text{C}$, которые необходимы для решения задачи переноса излучения в облачных образованиях.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ

Формулы работы (Meissner, Wentz, 2004) для ϵ для двухчастотной модели в случае химически чистой воды имеют вид:

$$\epsilon(T) = \frac{\epsilon_s(T) - \epsilon_1(T)}{1 + if/f_1(T)} + \frac{\epsilon_1(T) - \epsilon_\infty(T)}{1 + if/f_2(T)} + \epsilon_\infty(T), \quad (1)$$

$$\epsilon_s(T) = \frac{3.70886 \times 10^4 - 8.2168 \times 10^1 T}{4.21854 \times 10^2 + T}, \quad (2)$$

$$\epsilon_1(T) = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2, \quad (3)$$

$$f_1(T) = \frac{A + T}{\alpha_3 + \alpha_4 T + \alpha_5 T^2}, \quad (4)$$

$$\epsilon_\infty(T) = \alpha_6 + \alpha_7 T, \quad (5)$$

$$f_2(T) = \frac{A + T}{\alpha_8 + \alpha_9 T + \alpha_{10} T^2}. \quad (6)$$

Здесь T – температура в градусах Цельсия, f , f_1 , f_2 – частота поля и две частоты релаксации в ГГц. Параметр A и коэффициенты $a_0...a_{10}$ определены в (Bordonskiy et al., 2020) из измерений в резонаторах на частотах 7.6...9.7 ГГц в области температур $0...-70^\circ\text{C}$. Новые значения коэффициентов приведены в таблице 1. $A = 130$. Их значения приведены без указания размерности.

Возникает вопрос – почему f_1 и f_2 испытывают немонотонные изменения в области температур от -70 до 100°C . Для решения этого вопроса можно рассмотреть зависимости f_1 и f_2 от температуры, представленные на рис. 1, вычисленные из формул (1–6) по значениям коэффициентов из работы (Meissner, Wentz, 2004) и с учетом новых данных в области переохлаждения воды (и до $+4^\circ\text{C}$).

Из рис. 1 следует, что частота релаксации f_1 монотонно убывает при понижении температуры от $+80$ до -70°C , f_2 – растет при понижении температуры от $+100$ до -3°C и, далее, начинает падать. f_2 имеет характерный экстремум, однако и

f_1 имеет особенности. Представленные зависимости частот релаксации определяют диэлектрическую проницаемость воды в микроволновом диапазоне. f_1 по новым измерениям в области переохлаждения принимает значения от 10 до 1 ГГц, а f_2 – 300...20 ГГц. Из этих данных следует, что именно f_2 определяет ϵ на частотах выше 100 ГГц. Возможно, что полученные аналитические зависимости будут справедливы и до 500 ГГц, однако требуется их экспериментальное уточнение. На еще более высоких частотах потребуются учет влияния линий колебательного спектра молекул воды (и их кластеров).

Для определения причин возникновения двух температурных областей с различными коэффициентами в (3)...(6) были найдены производные частот релаксации по температуре. Наиболее информативными оказались вторые производные $\partial^2 f_{1,2}/\partial T^2$. Графики для них приведены на рис. 2, 3 с перекрытием при температурах от -20 до $+8^\circ\text{C}$. Отличие производных при состыковке графиков для положительных и отрицательных температур связано с погрешностями экспериментального определения ϵ в работах (Meissner, Wentz, 2004, Bordonskiy et al., 2020). Оно определяется и более сложными зависимостями частот релаксации в переходной области температур от стабильного к метастабильному состояниям воды. Графики второй производной, в отличие от графиков f_1 и f_2 (рис. 1), позволяют наглядно выделить области температуры, где происходят существенные изменения электрофизических характеристик воды.

Особенность вблизи $+4^\circ\text{C}$ в виде глубокого минимума можно связать с известным экстремумом плотности воды при $+3.98^\circ\text{C}$ (для давления 0.1 МПа) (Chaplin, 2020). Если считать, что эта особенность электромагнитных свойств воды

Таблица 1. Значения коэффициентов α_{0-10} в формулах (3–6)

i	α_i	i	α_i
0	5.6500	6	3.6143
1	1.6960×10^{-2}	7	2.8841×10^{-2}
2	-1.4810×10^{-4}	8	3.9208×10^{-1}
3	1.4627×10^1	9	-3.2094×10^{-3}
4	-4.2926×10^{-1}	10	7.6578×10^{-4}
5	7.5714×10^{-3}		

определяется молекулярным взаимодействием, то можно обратить внимание на особую аномалию, а именно, необычный температурный ход плотности воды (ρ_0) при температурах от $+4$ до -70°C . В этом температурном интервале плотность падает от значения ~ 1.0 до 0.9 г/см³ (в отличие от характеристик “обычных” жидкостей, у которых ρ_0 возрастает при охлаждении).

Данное свойство определяется, по современным представлениям, структурными изменениями и взаимодействием двух видов кластеров воды: HDL – воды высокой плотности и LDL – воды низкой плотности (Woutersen et al., 2018). Их изменение происходит на пикосекундных временах. Концентрация и характеристики этих кластеров определяются термодинамической температурой среды. При температуре $\rightarrow 100^\circ\text{C}$ практически полностью преобладает HDL, а при -70°C преобладает LDL. Их концентрации выравниваются в области $-50...-60^\circ\text{C}$, где наблюдается наиболее яркая аномалия воды, линия Видома – локус в фазовом пространстве давление-температура, где резко возрастают флуктуации плотности и энтропии, а теплоемкость при постоянном давлении имеет максимум (Anisimov, 2012). С линией Видо-

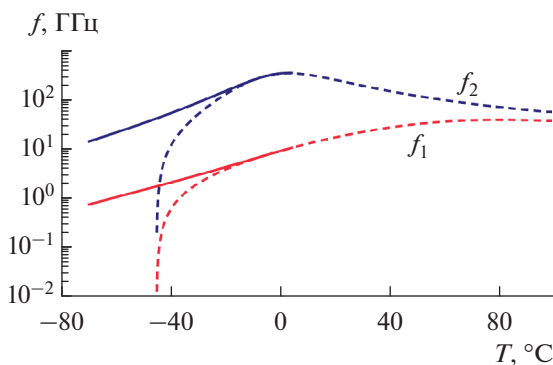


Рис. 1. Зависимости двух частот релаксации в формуле (1) от температуры в полулогарифмической шкале для интервала $-70...+4^\circ\text{C}$. Штриховой линией представлены результаты работы (Meissner, Wentz, 2004) для интервала $-45...+100^\circ\text{C}$.

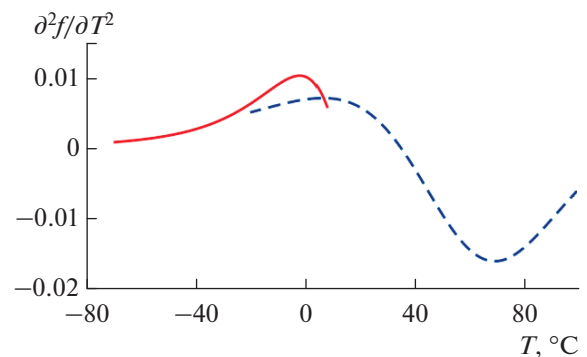


Рис. 2. Зависимость второй производной частоты релаксации f_1 по температуре от значения температуры. Штриховая линия – расчет по данным из (Meissner, Wentz, 2004).

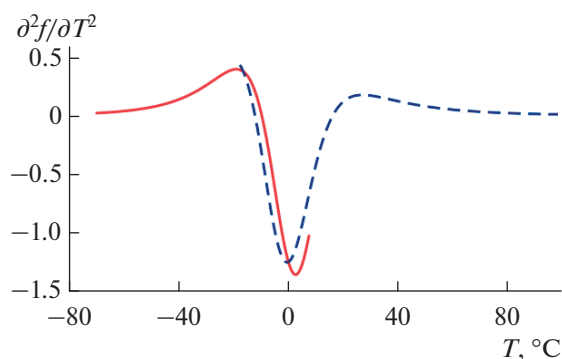


Рис. 3. Вторая производная частоты релаксации f_2 по температуре в зависимости от значения температуры. Штриховая линия — расчет по данным из (Meissner, Wentz, 2004).

ма связана вторая критическая точка воды, ее положение в фазовом пространстве соответствует приблизительно значению температуры -60°C и давлению ~ 100 МПа (Hundle et al., 2017).

Можно предположить, что проявление особых физических аномалий воды при температурах ниже $+4^\circ\text{C}$ приводит к изменению характера релаксации и зависимостей частот релаксации от температуры в области $+4\dots-70^\circ\text{C}$. Отсюда вытекают: 1 — целесообразность введения второго члена в уравнение для диэлектрической проницаемости (то есть рассмотрение двухчастотной модели Дебая) из-за особенностей поляризации в структуре двух видов кластеров воды HDL и LDL; 2 — рассмотрение двух температурных областей релаксации вследствие влияния на этот процесс второй критической точки воды в области ее переохлаждения. Поэтому пограничное значение температуры, где происходит изменение характера зависимости f_2 , находится вблизи $+4^\circ\text{C}$, ниже которой наблюдается известная аномальная зависимость $\rho_0(T)$. Можно также ожидать изменения характера f_2 вблизи температуры -70°C , где аномалия ρ_0 исчезает. Однако проверка данной особенности, в настоящее время, практически невозможна из-за отсутствия эффективного метода получения объемной воды при температурах ниже -70°C . В природной среде в тропосферных облаках наблюдали наиболее низкую температуру микрокапельной воды -37°C (Rosenfeld, Woodley, 2000). В лабораторных условиях удалось получить температуру -46°C при испарении капель микронных размеров на время порядка миллисекунд (Sellberg et al., 2014). Структуру этих капель исследовали с помощью рентгеновского лазера фемтосекундной длительности. Тем не менее, на короткое время, глубоко переохлажденная вода может образовываться из газовой фракции в стратосфере и мезосфере, конденсируясь на твердых частицах при процессах химических превраще-

ний, с последующим ее переходом в лед (Russell, 2021).

РАСЧЕТЫ

В настоящем исследовании выполнены расчеты массового коэффициента поглощения (α_L) микрокапельных облаков (без учета эффектов рассеяния, которые проявляются в миллиметровом диапазоне для капель диаметром более 50 мкм (Battaglia et al., 2014)), и их сравнение с имеющимися данными для коротковолнового участка миллиметрового диапазона. Для него имеются расчеты и экспериментальная оценка до частоты 170 ГГц (Cadeddu, Turner, 2011), а также до 225 ГГц в (Turner et al., 2016). Массовый коэффициент поглощения, выраженный в непер/см, отнесенных к $\text{г}/\text{см}^3$, рассчитывали с использованием приближения Релея:

$$\alpha_L = \frac{6\pi}{\lambda\rho_0} \text{Im} \left(\frac{\hat{\epsilon} - 1}{\hat{\epsilon} + 2} \right), \quad (7)$$

где λ — длина волны излучения, ρ_0 — плотность объемной воды, слабо зависящая от температуры. При этом коэффициент поглощения $\gamma = \alpha_L \rho_L$, где ρ_L — плотность водного аэрозоля.

Значения $\hat{\epsilon}$ в зависимости от длины волны и температуры находили из формул (1–6). Результаты расчетов α_L , как функции частоты, для различных значений температуры в области глубокого переохлаждения воды приведены на рис. 4, а, 4, б.

На рис. 5 приведены результаты расчетов α_L для частоты 170 и 130 ГГц, для которых имеются экспериментальные данные, в зависимости от температуры, графики 1, 2. Для сравнения также приведены графики для модели диэлектрической проницаемости на тех же частотах из статьи (Meissner, Wentz, 2004) — 3 (170 ГГц), 4 (130 ГГц).

Выполнено сравнение имеющихся в литературе данных (Cadeddu, Turner, 2011) с результатами новых расчетов — рис. 6. На нем приведены три точки для температур -30 , -20 и 0°C . Расхождения имеют место при температурах ниже -10°C . Точка при -30°C новых расчетов имеет значение около 24 (непер/см)/(г/см³), что находится в верхней части результатов различных экспериментальных моделей.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Из представленных результатов сравнения массового коэффициента поглощения в миллиметровом диапазоне при понижении температуры облачного аэрозоля до -30°C наиболее близка к нашим расчетам модель L91 (Liebe et al., 1991). Различие данных сильно возрастает для существующих моделей при температурах ниже -10°C .

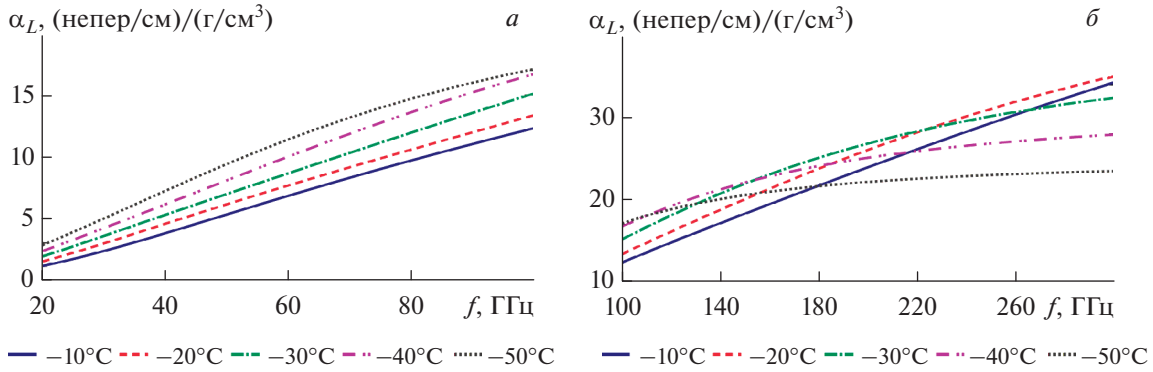


Рис. 4. Зависимости массового коэффициента поглощения от частоты для различных значений температур водного аэрозоля: а – для 20–100 ГГц, б – для 100–300 ГГц.

По этой причине предпочтительна представленная авторами модель, так как она основана на экспериментально найденных зависимостях частот релаксации в области глубокого переохлаждения. При этом обнаруживаются особенности поведения массового коэффициента поглощения в зависимости от температуры и частоты. На частотах 10...100 ГГц он возрастает с понижением температуры. Напротив, при стремлении частоты к 300 ГГц характер зависимости α_L изменяется, и массовый коэффициент поглощения уменьшается при понижении температуры. В диапазоне 100...300 ГГц обнаруживаются частотные интервалы, где массовый коэффициент поглощения слабо зависит от температуры, имеет место экстремум при некоторой температуре. Эти особенности определяются зависимостями f_1 и f_2 от температуры.

2. Особенности поведения электромагнитных характеристик переохлажденной воды, по-видимому, связаны с существованием ее известных термодинамических аномалий. Аномалии определяются характеристиками структурной организации воды в виде взаимодействующих кластеров HDL и LDL: воды высокой и низкой плотности.

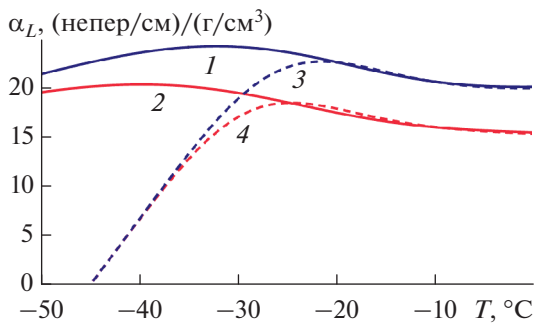


Рис. 5. Зависимости массового коэффициента поглощения от температуры на частоте 170 и 130 ГГц – 1, 2; расчет по модели (Meissner, Wentz, 2004) – 3, 4.

Этим объясняется необходимость описания диэлектрической релаксации с использованием двух частот релаксации в модели Дебая. Другую особенность – существование двух температурных областей диэлектрической релаксации можно объяснить влиянием второй критической точки и связанной с ней линией Видома в области отрицательных температур.

3. Получение холодной воды в интервале температур $-20...-70^\circ\text{C}$ представляет сложную техническую проблему. При этом предложенные методы ее получения, например, при охлаждении в порах нанометровых размеров ставят задачу не только разработки методик переохлаждения, но и вопрос соответствия ее характеристик идеальной объемной метастабильной воде. Такая идеальная вода обычно рассматривается при компьютерном моделировании, где кластер (ограниченного размера), как правило, находится в свободном состоянии. В эксперименте всегда имеется влияние стенок пор и геометрии кластеров воды на элект-

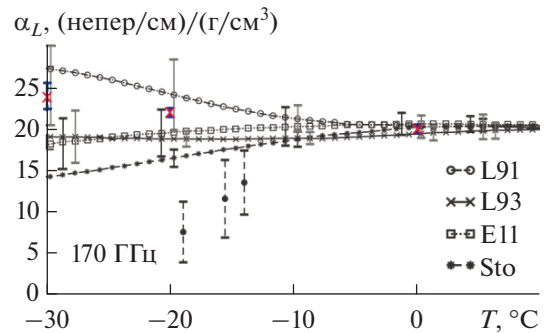


Рис. 6. Результаты измерений массового коэффициента поглощения от температуры и результаты вычислений для четырех моделей из статьи (Cadettu, Turner, 2011): L91 – (Liebe et al., 1991), L93 – (Liebe et al., 1993), E11 – (Ellison, 2007), Sto – (Stogryn, 1995). Результаты новых расчетов отмечены в виде крестиков.

ромагнитный отклик. При этом характеристики воды могут определяться предысторией ее получения. Например, известно, что молекулы воды могут находиться в двух спиновых состояниях — орто и пара, характеризующихся параллельным и антипараллельным направлением спинов протонов (Kilaj et al., 2018). Молекулы с этими состояниями были пространственно разделены в специальных экспериментах на кластеры (Horke et al., 2014), которые могли сохраняться длительное время. Предсказывался отклик воды в зависимости от температуры на электромагнитные воздействия на определенных частотах из-за спиновых взаимодействий (Pershin, 2008). Поэтому можно предположить, что различные реальные водные образования будут иметь отличия диэлектрических характеристик, особенно в области отрицательных температур, где объемная вода термодинамически может находиться только в метастабильном состоянии. Решение данного вопроса дело будущих исследований.

4. Особой точкой на температурной зависимости в области глубокого переохлаждения является температура на линии Видома — локусе повышенных флуктуаций энтропии и плотности, проявляющихся в экстремуме теплоемкости при постоянном давлении (Ландау, Лифшиц, 2002). Вблизи этой линии находится и область повышенных флуктуаций энергии молекул, проявляющихся уменьшением теплоемкости при постоянном объеме (Ландау, Лифшиц, 2002). Высказывалось предположение, что этот рост флуктуаций энергии может приводить к возрастанию скорости химических превращений (Бордонский, Гурулев, 2019), а также некоторому росту фактора потерь воды в микроволновом диапазоне вблизи -45°C при давлении 0.1 МПа (соответствующей точке на линии Видома вблизи нормального атмосферного давления) (Бордонский, Орлов, 2019). Однако новые измерения не выявляют в пределах ошибок значительного эффекта приращения $\Delta\epsilon''$, либо он относится к узкому температурному интервалу и его сложно определить при автоматизированных измерениях с последующим усреднением результатов гладкими функциями, как это было выполнено в последующей работе (Bordonskiy et al., 2020).

5. В настоящее время сложно сделать вывод о точности соответствия микроволновых характеристик переохлажденной воды для тех или иных ее образований (в каплях микроэмульсий; в порах с различными материалами стенок; в растворах солей; в капельной жидкости аэрозолей; в биологических тканях; в воде, подвергающейся высоким давлениям и вариациям изотопного состава и т.д.). По существу, это связывается с отсутствием достаточного числа работ по экспериментальному исследованию холодной воды при глубоком

переохлаждении, кроме работ (Бордонский, Орлов, 2019, Bordonskiy et al., 2020), где измерения выполнены до -70°C в нанопористых силикатных материалах. Из обзора (Turner et al., 2016) следует, что за последнее столетие выполнено всего шесть лабораторных экспериментов для температур воды ниже -5°C , причем оценки ошибок определения ϵ' достигают 150%. В (Bordonskiy et al., 2020) точность измерений ϵ' и ϵ'' оценивалась значением \sim единиц процентов вблизи -20°C и \sim десятков процентов при -40°C . Эти данные определяют точность вычисления α_L по расчетам. При экстремально низких температурах она оказывается также в пределах нескольких десятков процентов. Тем не менее, такая точность определения α_L выше, чем разброс этой величины ($>100\%$) в моделях, представленных в (Turner et al., 2016) для частотного диапазона 1...500 ГГц и температур ниже -30°C .

ВЫВОДЫ

1. В настоящей работе на основе недавно выполненных экспериментов по измерению диэлектрической проницаемости переохлажденной воды до -70°C в микроволновом диапазоне (Bordonskiy et al., 2020) был рассчитан массовый коэффициент поглощения в облачных образованиях без учета рассеяния излучения на частотах 100...300 ГГц. Для расчетов использована модель Дебая с двумя частотами релаксации, которые устремляются к нулевому значению при температуре стеклования, равной -130°C . Одна из частот релаксации изменяется в пределах 20...300 ГГц, поэтому предполагается справедливость полученных результатов, по крайней мере, до 300 ГГц.

2. Расчеты массового коэффициента поглощения выявили особенности его частотных и температурных зависимостей. Необычным оказывается рост поглощения при понижении температуры на частотах до 180 ГГц. В диапазоне 100...300 ГГц обнаружены частотные интервалы, где имеет место слабая зависимость поглощения в некоторых областях температуры облачного аэрозоля (например, для частоты 120 ГГц это участок $-30...-50^{\circ}\text{C}$). Найденные особенности определяются температурным поведением двух частот релаксации воды в широком интервале температур. Особый характер их зависимостей, в свою очередь, определяется электрофизическими характеристиками кластеров воды низкой и высокой плотности (LDL и HDL) и влиянием на них второй критической точки.

3. Полученные результаты позволяют верифицировать имеющиеся экспериментальные данные о коэффициенте поглощения. Кроме того, на основе новых знаний о диэлектрической проницаемости глубоко переохлажденной воды в мил-

лиметровом диапазоне можно решать задачи по расчету эффектов переноса излучения в аэрозолях с учетом рассеяния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башаринов А.Е., Кутуза Б.Г.* Исследования радиоизлучения и поглощения облачной атмосферы в миллиметровом и сантиметровом диапазонах // Труды ГГО. Л.: Гидрометеоздат, 1968. № 222. Перенос микроволнового излучения в атмосфере. С. 100–110.
- Башаринов А.Е., Кутуза Б.Г.* Определение температурной зависимости времени релаксации молекул воды в облаках и возможности оценки эффективной температуры капельных облаков по СВЧ радиометрическим измерениям // Изв. Вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17. № 1. С. 52–57.
- Бордонский Г.С., Гурулев А.А.* О физико-химических превращениях с участием воды вблизи температуры –45°C // Конденсированные среды и межфазные границы. 2019. Т. 21. № 4. С. 478–489.
<https://doi.org/10.17308/kcmf.2019.21/2359>
- Бордонский Г.С., Орлов А.О.* Сравнение различных моделей фактора потерь переохлажденной воды с экспериментальными данными в микроволновом диапазоне // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 104–112.
<https://doi.org/10.31857/S0205-961420193104-112>
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 5. Статистическая физика. М.: Наука, 2002. 616 с.
- Меньшиков Л.И., Меньшиков П.Л., Федичев П.О.* Феноменологическая модель гидрофобных и гидрофильных взаимодействий // ЖЭТФ. 2017. Т. 152. № 6. С. 1374–1392.
<https://doi.org/10.7868/S0044451017120215>
- Anisimov M.A.* Cold and supercooled water: a novel supercritical-fluid solvent // Russ. J. Phys. Chem. B. 2012. V. 6. № 8. P. 861–867.
<https://doi.org/10.1134/S199079311208009X>
- Battaglia A., Westbrook C.D., Kneifel S., Kollias P., Humpage N., Löhnert U., Tuynelä J., Petty G.W.* G band atmospheric radars: new frontiers in cloud physics // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7. № 6. P. 1527–1546.
<https://doi.org/10.5194/amt-7-1527-2014>
- Bertolini D., Cassettari M., Salvetti G.* The dielectric relaxation time of supercooled water // J. Chem. Phys. 1982. V. 76. № 6. P. 3285–3290.
<https://doi.org/10.1063/1.443323>
- Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O.* Dielectric permittivity of deeply supercooled water according to the measurement data at the frequencies 7.6 GHz and 9.7 GHz // Preprint arXiv: 2005.07001v1. [cond-mat.soft]. 14 May 2020. 6 p.
- Cadeddu M.P., Turner D.D.* Evaluation of water permittivity models from ground-based observations of cold clouds at frequencies between 23 and 170 GHz // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2011. V. 49. № 8. P. 2999–3008.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2121074>
- Cerveny S., Mallamace F., Swenson J., Vogel M., Xu L.* Confined water as model of supercooled water // Chem. Rev. 2016. V. 116. № 13. P. 7608–7625.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00609>
- Chaplin M.* Water structure and science. URL: http://www.lsbu.ac.uk/water/martin_chaplin.html (дата обращения 22.05.2020).
- Ellison W.J.* Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0–25THz and the temperature range 0–100°C // J. Chem. Phys. Ref. Data. 2007. V. 36. № 1. P. 1–18.
<https://doi.org/10.1063/1.2360986>
- Greaves J.S., Richards A.M.S., Bains W., Rimmer P.B., Sagan H., Clements D.L., Seager S., Petkowski J.J., Sousa-Silva C., Ranjan S., Drabek-Maunder E., Fraser H.J., Cartwright A., Mueller-Wodarg I., Zhan Z., Friberg P., Coulson I., Lee E., Hoge J.* Phosphine gas in the cloud decks of Venus // Nature Astronomy. 2021. V. 5. P. 655–664.
<https://doi.org/10.1038/s41550-020-1174-4>
- Horke D.A., Chang Y.-P., Długołęcki K., Küpper J.* Separating para and ortho water // Angewandte Chemie. 2014. V. 53. № 44. P. 11965–11968.
<https://doi.org/10.1002/anie.201405986>
- Hundle P.H., Loerting T., Scortino F.* Supercooled and glassy water: Metastable liquid(s), amorphous solid(s), and no-man’s land // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. 2017. V. 114. № 51. P. 13336–1/4.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1700103114>
- Kilaj A., Gao H., Rösch D., Rivero U., Küpper J., Willitsch S.* Observation of different reactivities of para and ortho-water towards trapped diazenylium ions // Nature Communications. 2018. V. 9. P. 2096/1-7.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-04483-3>
- Liebe H.J., Hufford G.A., Cotton M.G.* Propagation modeling of moist air suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz // Proc. NATO/AGARD Wave Propagation Panel, 52nd meeting. 17–20 May 1993. Mallorca, Spain. № 3/1–10.
- Liebe H.J., Hufford G.A., Manabe T.* A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1991. V. 12. № 7. P. 659–675.
<https://doi.org/10.1007/BF01008897>
- Meissner T., Wentz F.J.* The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2004. V. 42. № 9. P. 1836–1849.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.831888>
- Pershin S.M.* Coincidence of rotational energy of H₂O ortho-para molecules and translation energy near specific temperatures in water and ice // Physics of Wave Phenomena. 2008. V. 16. № 1. P. 15–25.
<https://doi.org/10.1007/s11975-008-1003-x>
- Rosenfeld D., Woodley W.L.* Deep convective clouds with sustained supercooled liquid water down to –37.5°C // Nature. 2000. V. 405. P. 440–442.
<https://doi.org/10.1038/35013030>
- Russell J.M.* Observations of polar mesospheric clouds from space and their scientific implications. [electronic resource].
https://www.agci.org/sites/default/files/pdfs/lib/main/10S1_0616_JRussell.pdf (submittal date: 26.02.2021).

Sellberg J.A., Huang C., McQueen T.A., Loh N.D., Laksmo H., Schlesinger D., Sierra R.G., Nordlund D., Hampton C.Y., Starodub D., DePonte D.P., Beye M., Chen C., Martin A.V., Barty A., Wikfeldt K.T., Weiss T.M., Caronna C., Feldkamp J., Skinner L.B., Seibert M.M., Messerschmidt M., Williams G.J., Boutet S., Pettersson L.G.M., Bogan M.J., Nilsson A. Ultrafast X-ray probing of water structure below the homogeneous ice nucleation temperature // *Nature*. 2014. V. 510. № 7505. P. 381–384.
<https://doi.org/10.1038/nature13266>

Sharkov E.A. Passive microwave remote sensing of the Earth: Physical foundations. Berlin: Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.

Stogryn P.A., Bull H.T., Rubayi K., Iravanchy S. The microwave permittivity of sea and fresh water. GenCorp Aerojet, Azusa, Calif., 1995. 24 p.

Turner D.D., Kneifel S., Cadeddu M.P. An improved liquid water absorption model at microwave frequencies for supercooled water clouds // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2016. V. 33. P. 33–44.

<https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0074.1>

Woutersen S., Ensing B., Hilbers M., Zhao Z., Angell C.A. A liquid-liquid transition in supercooled aqueous solution related to the HDA-LDA transition // *Science*. 2018. V. 359. № 6380. P. 1127–1131.

<https://doi.org/10.1126/science.aao7049>

Absorption Coefficient of Cold Cloudy Aerosol at Frequencies of 100–300 GHz

G. S. Bordonskiy¹ and A. O. Orlov¹

¹*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia*

Calculations of the mass absorption coefficient in water aerosol of cloud formations at temperatures of 0...–50°C at frequencies of 100–300 GHz have been performed. In the calculations, the two-frequency Debye model for the dielectric constant was used, in which the relaxation frequencies of supercooled water were obtained from new experiments performed in the centimeter range. Of these, one relaxation frequency takes on the values of 10–1 GHz, the other – 300–20 GHz in the specified temperature range. The calculations are compared with the available experimental data of other authors up to a frequency of 170 GHz and a temperature of –30°C. There is a significant scatter in the experimental data on the mass absorption coefficient and the absence of satisfactory models for supercooled water below –20°C. On the basis of the performed research, it is assumed that the proposed refined formulas for the dielectric constant make it possible to determine the mass absorption coefficient up to frequencies of 200–300 GHz.

Keywords: supercooled water, microwaves, dielectric constant models, mass absorption coefficient, water aerosol

REFERENCES

Anisimov M.A. Cold and supercooled water: a novel supercritical-fluid solvent // *Russ. J. Phys. Chem. B*. 2012. V. 6. № 8. P. 861–867.

<https://doi.org/10.1134/S199079311208009X>

Basharinov A.E., Kutuza B.G. Issledovaniya radioizlucheniya i pogloscheniya oblachnoy atmosfery v millimetrovom i santimetrovom diapazonah [Investigations of radio emission and absorption of cloudy atmosphere in millimeter and centimeter ranges] // *Trudy GGO. L.: Gidrometeoizdat*, 1968. №. 222. Perenos mikrovolnovogo izlucheniya v atmosfere. P. 100–110. (In Russian)

Basharinov A.E., Kutuza B.G. Opredelenie temperaturnoy zavisimosti vremeni relaksatsii molekul vody v oblakakh i vozmozhnosti otsenki effektivnoy temperatury kapel'nykh oblakov po SVCh radiometricheskim izmereniyam [Determination of the temperature dependence of the relaxation time of water molecules in clouds and the possibility of estimating the effective temperature of drop clouds from microwave radiometric measurements] // *Izvestiya Vuzov. Radiofizika*. 1974. V. 17. № 1. P. 52–57. (In Russian)

Battaglia A., Westbrook C.D., Kneifel S., Kollias P., Humpage N., Löhnert U., Tyynelä J., Petty G.W. G band atmospheric radars: new frontiers in cloud physics // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7. № 6. P. 1527–1546. doi: 10.5194/amt-7-1527-2014.

Bertolini D., Cassettari M., Salvetti G. The dielectric relaxation time of supercooled water // *J. Chem. Phys.* 1982.

V. 76. № 6. P. 3285–3290.

<https://doi.org/10.1063/1.443323>

Bordonskiy G.S., Gurulev A.A. O fiziko-khimicheskikh prevrashcheniyah s uchastiem vody vblizi temperatury –45°C [Regarding physical and chemical transformations with the involvement of water near –45°C] // *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy*. 2019. V. 21. № 4. P. 478–489.

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2019.21/2359>. (In Russian)

Bordonskiy G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O. Dielectric permittivity of deeply supercooled water according to the measurement data at the frequencies 7.6 and 9.7 GHz // Preprint arXiv: 2005.07001v1. [cond-mat.soft]. 14 May 2020. 6 p.

Bordonskiy G.S., Orlov A.O. Svravnenie razlichnykh modeley faktora poter' pereohlazhdennoy vody s eksperimental'nymi dannymi v mikrovolnovom diapazone [Comparison of various models of supercooled water-loss factor with experimental data in the microwave range] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2019. № 3. P. 104–112.

<https://doi.org/10.31857/S0205-961420193104-112>. (In Russian)

Cadeddu M.P., Turner D.D. Evaluation of water permittivity models from ground-based observations of cold clouds at frequencies between 23 and 170 GHz // *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.* 2011. V. 49. № 8. P. 2999–3008.

<https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2121074>

- Cervený S., Mallamace F., Swenson J., Vogel M., Xu L.* Confined water as model of supercooled water // *Chem. Rev.* 2016. V. 116. № 13. P. 7608–7625.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00609>
- Chaplin M.* Water structure and science. 2020. URL: http://www.lsbu.ac.uk/water/martin_chaplin.html
- Ellison W.J.* Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0–25THz and the temperature range 0–100°C // *J. Chem. Phys. Ref. Data.* 2007. V. 36. № 1. P. 1–18.
<https://doi.org/10.1063/1.2360986>
- Greaves J.S., Richards A.M.S., Bains W., Rimmer P.B., Saga-wa H., Clements D.L., Seager S., Petkowski J.J., Sousa-Silva C., Ranjan S., Drabek-Maunders E., Fraser H.J., Cartwright A., Mueller-Wodarg I., Zhan Z., Friberg P., Coulson I., Lee E., Hoge J.* Phosphine gas in the cloud decks of Venus // *Nature Astronomy.* 2021. V. 5. P. 655–664.
<https://doi.org/10.1038/s41550-020-1174-4>
- Horke D.A., Chang Y.-P., Długołęcki K., Küpper J.* Separating para and ortho water // *Angewandte Chemie.* 2014. V. 53. № 44. P. 11965–11968. doi: 10.1002/anie.201405986.
- Hundle P.H., Loerting T., Scortino F.* Supercooled and glassy water: Metastable liquid(s), amorphous solid(s), and no-man's land // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA.* 2017. V. 114. № 51. P. 13336–1/4.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1700103114>
- Kilaj A., Gao H., Rösch D., Rivero U., Küpper J., Willitsch S.* Observation of different reactivities of para and ortho-water towards trapped diazenylium ions // *Nature Communications.* 2018. V. 9. P. 2096/1–7.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-04483-3>
- Landau L.D., Lifshits E.M.* Teoreticheskaya fizika. T. 5. Statisticheskaya fizika [Theoretical physics. V. 5. Statistical physics]. M.: Nauka, 2002. 616 p. (In Russian)
- Liebe H.J., Hufford G.A., Cotton M.G.* Propagation modeling of moist air suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz // *Proc. NATO/AGARD Wave Propagation Panel, 52nd meeting, 17-20 May 1993, Mallorca, Spain.* № 3/1–10.
- Liebe H.J., Hufford G.A., Manabe T.* A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves.* 1991. V. 12. № 7. P. 659–675.
<https://doi.org/10.1007/BF01008897>
- Meissner T., Wentz F.J.* The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2004. V. 42. № 9. P. 1836–1849.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.831888>
- Men'shikov L.I., Men'shikov P.L., Fedichev P.O.* Fenomenologicheskaya model' gidrofobnyh i gidrofil'nyh vzaimodeystviy [Phenomenological model of hydrophobic and hydrophilic interactions] // *ZhETF.* 2017. V. 152. № 6. P. 1374–1392.
<https://doi.org/10.7868/S0044451017120215>. (In Russian)
- Pershin S.M.* Coincidence of rotational energy of H₂O ortho-para molecules and translation energy near specific temperatures in water and ice // *Physics of Wave Phenomena.* 2008. V. 16. № 1. P. 15–25.
<https://doi.org/10.1007/s11975-008-1003-x>
- Rosenfeld D., Woodley W.L.* Deep convective clouds with sustained supercooled liquid water down to –37.5°C // *Nature.* 2000. V. 405. P. 440–442.
<https://doi.org/10.1038/35013030>
- Russell J.M.* Observations of polar mesospheric clouds from space and their scientific implications. [electronic resource]. URL: https://www.agci.org/sites/default/files/pdfs/lib/main/10S1_0616_JRussell.pdf (submission date: 26.02.2021).
- Sellberg J.A., Huang C., McQueen T.A., Loh N.D., Laksmo-no H., Schlesinger D., Sierra R.G., Nordlund D., Hampton C.Y., Starodub D., DePonte D.P., Beye M., Chen C., Martin A.V., Barty A., Wikfeldt K.T., Weiss T.M., Caronna C., Feldkamp J., Skinner L.B., Seibert M.M., Messerschmidt M., Williams G.J., Boutet S., Pettersson L.G.M., Bogan M.J., Nilsson A.* Ultrafast X-ray probing of water structure below the homogeneous ice nucleation temperature // *Nature.* 2014. V. 510. № 7505. P. 381–384.
<https://doi.org/10.1038/nature13266>
- Sharkov E.A.* Passive microwave remote sensing of the Earth: Physical foundations. Berlin: Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.
- Stogryn P.A., Bull H. T., Rubayi K., Iravanchy S.* The microwave permittivity of sea and fresh water. GenCorp Aerojet, Azusa, Calif., 1995. 24 p.
- Turner D.D., Kneifel S., Cadeddu M.P.* An improved liquid water absorption model at microwave frequencies for supercooled water clouds // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2016. V. 33. P. 33–44.
<https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0074.1>
- Woutersen S., Ensing B., Hilbers M., Zhao Z., Angell C.A.* A liquid-liquid transition in supercooled aqueous solution related to the HDA-LDA transition // *Science.* 2018. V. 359. № 6380. P. 1127–1131.
<https://doi.org/10.1126/science.aao7049>

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ОБЛАЧНЫХ ПЛАТФОРМ ОБРАБОТКИ И АНАЛИТИКИ ДАННЫХ ДЗЗ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОДУКТОВ НА ИХ ОСНОВЕ

© 2022 г. А. А. Емельянов^{a, b}, М. В. Ерешко^{a, *}, О. С. Сизов^a, А. В. Борисов^a

^aАО “Российские космические системы”, Москва, Россия

^bАО “Научно-исследовательский институт точных приборов”, Москва, Россия

*E-mail: contact@spacecorp.ru

Поступила в редакцию 25.06.2021 г.

Активное развитие орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) привело к накоплению больших объемов данных ДЗЗ, которые требуют новейших подходов к организации хранения и оперативного доступа к ним для аналитики в режиме реального времени. На фоне переориентации потребительского интереса от получения данных ДЗЗ первичных (стандартных) уровней обработки к использованию интегрированной виртуальной среды применения данных и продуктов ДЗЗ, наиболее перспективным и востребованным форматом взаимодействия с различными категориями пользователей является облачная платформа обработки и анализа данных ДЗЗ (облачная платформа). Существующее многообразие облачных платформ затрудняет понимание пользователями внутренней структуры и связанности составных элементов с точки зрения функциональных и потребительских свойств, что приводит к необходимости их научной систематизации. В данной работе приведены результаты обзорного анализа зарубежных и российских облачных платформ. Выделена типовая структура облачной платформы, каждый слой которой имеет собственный характер функционирования, автономности, стандартизации и горизонтальной масштабируемости. Результаты проведенного обзора показали, что облачные платформы являются наиболее перспективным направлением развития средств обработки и анализа данных ДЗЗ.

Ключевые слова: облачная платформа, дистанционное зондирование Земли, науки о Земле, большие данные, облачные технологии

DOI: 10.31857/S020596142202004X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вследствие динамичного развития информационных и телекоммуникационных технологий открываются новые возможности для модернизации средств и инструментов обработки и распространения данных ДЗЗ. Концепция и логика оказания геоинформационных услуг подвергается изменениям, просматривается трансформация традиционных подходов к комплексу операций с данными ДЗЗ и предоставлению информационных продуктов на их основе пользователям.

Необходимость создания облачных платформ во многом определяется растущими объемами данных, получаемых с российских и зарубежных космических аппаратов (КА) ДЗЗ (Хайлов, Заичко, 2018), расширением перечня прикладных задач пользователей, решаемых с привлечением методов ДЗЗ (Борисов и др., 2013), и масштабным внедрением технологий Индустрии 4.0 (переход к программно-определяемой инфраструктуре) (Емельянов и др., 2020).

В частности, тенденция накопления больших объемов данных ДЗЗ характерна для орбитальной группировки КА Sentinel (Storch et al., 2019) — ежегодный объем поступающих “сырых” данных превышает 4 петабайта. По оценкам, в настоящее время ежесуточный прирост суммарного объема данных, производимых мировой ОГ КА ДЗЗ, достигает 1 петабайта (La Beaujardiere, 2019), что приводит к проблеме “больших данных”. Требуются новые подходы к обработке, анализу данных ДЗЗ, оптимизации их хранения и доступа к ним с привлечением облачных технологий. Одним из таких подходов является представление данных ДЗЗ в виде “кубов данных” (data cube), которые позволяют консолидировано хранить и предоставлять оперативный доступ к информации (Schmidt, 2019; Giuliani et al., 2019).

Целью исследования является обзор и систематизация облачных платформ обработки и аналитики данных ДЗЗ, а также выделение их типовой структуры и анализ перспективных способов

оказания услуг ДЗЗ пользователям различных сфер экономической деятельности.

ОБЗОР ОБЛАЧНЫХ ПЛАТФОРМ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЗЗ

Согласно определению Национального института стандартов и технологий США (Mell, Grance, 2012), облачные вычисления (cloud computing) реализуют модель обеспечения удобного сетевого доступа по требованию к некоторому общему фонду конфигурируемых вычислительных ресурсов, которые могут быть оперативно предоставлены пользователю с минимальными эксплуатационными затратами.

Сервис представляется как внешний интерфейс (верхняя граница облачной платформы) между пользователем и внутренней организацией платформы, используя функции веб-приложения. Таким образом, пользователю предоставляется полный объем необходимых ресурсов в соответствии с его требованиями, при минимальном включении данного пользователя в процесс подготовки и получения требуемого результата.

Появление облачных платформ хорошо согласуется с эволюцией концепции геоинформационных систем (ГИС) (OGC, ISO, 2014), в которой отражены уровни стандартов предоставления геопространственной информации, данных и продуктов ДЗЗ пользователям в зависимости от масштаба вовлеченных в сообщество заинтересованных сторон и многообразия механизмов управления ими:

– уровень 1 – обмен геопространственной информацией через Интернет, повсеместное использование рабочих мест с настольным программным обеспечением и серверов в локальных сетях. На рынке ДЗЗ и ГИС задействованы единицы слабовзаимодействующих между собой организаций-разработчиков программного обеспечения и поставщиков данных ДЗЗ (1990-е гг.);

– уровень 2 – партнерство по обмену геопространственной информацией – обмен, интеграция и использование геопространственных данных различных поставщиков. Усиление взаимодействия между сообществами в сферах ДЗЗ и ГИС, и, как следствие, рост потребности в стандартизации и внедрении спецификаций для представления географических характеристик и для обслуживания конкретных потребностей организаций-участников в области геопространственных технологий и сервисов. Планомерный рост числа поставщиков данных ДЗЗ (2000-е годы). На финальном этапе накопленный объем данных подталкивает к следующему шагу совместного развития ГИС и IT-технологий;

– уровень 3 – разработка глобальной инфраструктуры пространственных данных, которая обеспечивает доступ к нескольким источникам разнородной информации с возможностью их

интеграции в различных средах (мобильные приложения, web-сервисы облачных платформ и т.д.). Развитие сегмента высокотехнологических сервисов стимулирует коммерциализацию продуктов на основе данных ДЗЗ (Тюлин А.Е. и др., 2020). В оборот входит термин “Цифровая Земля” как система предоставления пользователям геоинформационных услуг и передовых технологий, включая ДЗЗ, ГИС, глобальное позиционирование, связь, сенсорные сети, виртуальную реальность (Grossner et al., 2008). (2010-е и начало 2020-х гг.);

– уровень 4 (будущее) – создание сетевой (консолидированной) модели доступа к пространственным данным, доставки геопространственной информации в сеть и наведения мостов между инфраструктурами пространственных данных и более широким сообществом информационных систем.

Развитие каждого уровня выражается в повышении производительности и эффективности использования технологий ДЗЗ и ГИС. В настоящее время решения в сфере ДЗЗ относятся ко второму и третьему уровням применения стандартов, с признаками перехода на четвертый уровень.

Ретроспективный анализ облачных платформ и приложений в сфере ДЗЗ показал, что первая волна таких платформ появилась в конце 2000-х гг. Наиболее развернутый обзор с краткими характеристиками платформ, по состоянию на 2013 г., приводится в (Evangelidis et al., 2014). В другом исследовании (Lü et al., 2011) по состоянию на 2010 г. описаны 13 платформы (в том числе, GoogleEarth, GoogleMaps, BingMaps), включая характеристику внутренней логики их функционирования. При этом отмечается тренд трансформации платформ общего назначения (общегеографические с картографическими слоями) в узкоспециализированные платформы для решения конкретных задач отдельных отраслей экономики и социальной сферы. Обзор облачных платформ (Gomes et al., 2020) в разрезе функциональных ожиданий (потребностей) и технических возможностей показал отсутствие универсальной платформы, а ее создание сопровождается затруднениями технологического и маркетингового плана.

При характеристике облачных платформ в первую очередь учитывается реализация следующих технических особенностей:

– интерфейс сервиса в веб-клиенте (веб-браузере), запуск или развертывание без предустановок и специфических настроек ближайшего окружения рабочего места (обязательный критерий);

– автоматическая обработка на средствах интегратора и предоставление информационных продуктов ДЗЗ в режиме он-лайн или близком к нему (обязательный критерий);

– оперативное поступление данных ДЗЗ от поставщиков или/и использование собственных данных ДЗЗ;

– открытая и детальная информация для потенциальных пользователей, какие услуги, в каком объеме, из каких данных ДЗЗ поставщиков формируются продукты, на каких условиях (сроки и стоимость) сервис может быть предоставлен;

– возможность пользователя участвовать в разработке алгоритмов и скриптов формирования продуктов ДЗЗ для дальнейшего встраивания в сервис для расширения его функциональности в интересах пользователя.

Облачные платформы можно разделить по функциональному назначению предоставляемых сервисов на: DaaS (данные ДЗЗ как сервис), SaaS (программное обеспечение обработки данных ДЗЗ как сервис), PaaS (платформенная среда обработки данных ДЗЗ как сервис), IaaS (инфраструктура сбора, обработки и хранения данных ДЗЗ как сервис). Соответственно, в разрезе функциональных свойств облачных платформ можно выделить следующие классы:

– предоставление данных ДЗЗ (собственные – Ia, сторонние – Ib);

– предоставление возможностей аналитики данных ДЗЗ (II);

– интеграция данных ДЗЗ и инструментов их аналитики в единой среде (III);

– предоставление инструментария для создания пользовательских сервисов (IV);

– предоставление облачной инфраструктуры хранения данных ДЗЗ и вычислительных ресурсов обработки (V).

Деление классов Ia и Ib достаточно условное, т.к. оператором данных ДЗЗ может выступать группа организаций из нескольких государств-участников (например, ЕС).

В табл. 1 приведен перечень изученных облачных платформ. В него не включены сервисы по предоставлению только облачной инфраструктуры для хранения данных ДЗЗ или вычислительных ресурсов для их обработки. Также не рассмотрены ресурсы, реализующие организационную форму доступа к настольному программному обеспечению (в сферах ГИС и ДЗЗ) с помощью удаленных рабочих столов (RDP), таких как GeoCloud (Райзман, 2019), CloudEO (Krischke, Benz, 2018) и др.

Изученные облачные платформы имеют различную степень технологической готовности и уровень раскрытия информации. Группа облачных платформ PerceptiveSentinel, EO VAS, EO-PEN, CANDELA, BETTER являются участниками программы Horizon-2020 (<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020>). Наличие нескольких однотипных проектов говорит о создании конкурентной среды между ними. Данные проекты ориентированы на опытную отработку технологий и разработку технических решений для дальнейшего масштабирования про-

ектов под эгидой Европейского космического агентства (ESA).

В 2017 г. ESA подписало контракт по созданию облачной платформы CreoDIAS с консорциумом, возглавляемым Creotech Instruments S.A., основная идея которой состоит в объединении хранилища данных петабайтного класса, получаемых различными операторами ДЗЗ и доступных пользователям вычислительных кластеров большой мощности, в целях оперативной аналитики и предоставлении результатов. Аналогичным образом были реализованы облачные платформы Mundi, Onda, Sobloo и Wekeo, по их назначению и функциональности они подобны CreoDIAS.

Maхar GBDX (Geospatial Big Data platform) декларируется как мощная облачная платформа, предназначенная для геопространственной аналитики больших данных и позволяющая извлекать значимую для потребителей информацию, такую как: идентификация объектов с помощью технологий искусственного интеллекта, численные параметры и масштабные изменения, с доступом к библиотеке данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения. Доступ к сервисам платформы GBDX из-за их коммерческой направленности возможен только после многоступенчатой регистрации с заключением соглашения.

Облачная платформа Google Earth Engine предоставляет данные ДЗЗ, информационные продукты и наборы геопространственных данных с возможностями анализа подстилающей поверхности Земли в глобальном масштабе, имеет средства программного взаимодействия (API) и другие инструменты, в том числе пользовательские, для анализа разнородных наборов данных. В (Gorelick et al., 2017) предпринята попытка выстроить упрощенную схему архитектуры системы на примере Google Earth Engine в разрезе укрупненных информационных сред, реализующих группу общих технических решений.

В экосистеме ERSI произошла переориентация известного продукта ArcGIS от настольного программного обеспечения к облачной платформе и ее сервисам в исполнении веб-приложения. На первом этапе был представлен продукт ArcGIS Notebook, далее – ArcGIS Platform (PaaS) и ArcGIS Online (SaaS). ArcGIS Platform аналогичен Maхar GBDX и Google Earth Engine, который использует ресурсы ESRI Python – открытые библиотеки для анализа, статистической обработки и машинного обучения.

Анализ облачной платформы Planet показал, что данное решение представляет собой сервис онлайн заказа и автоматической стандартной обработки данных ДЗЗ с КА, принадлежащих компаниям Planet и сторонним операторам. На коммерческих условиях возможен доступ к аналитике данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения (мониторинг изменений подстилающей

Таблица 1. Российские и зарубежные облачные платформы




Название облачной платформы	Назначение и решение прикладных задач	Функционал (информационное наполнение) и подходы к реализации	Степень готовности
<p>1. Геоаналитика.Агро (Россия) (http://agro.geoanalitika.com/ru/) [1б, II]*</p>  <p>Геоаналитика.Агро</p>	<p>1) Поддержка принятия решений в области сельского хозяйства. 2) Предоставление доступа к массиву разнообразной, постоянно обновляемой информации о состоянии сельскохозяйственной растительности, условиях произрастания и характере землепользования.</p>	<p>– анализ временных рядов данных ДЗЗ, метео- и другой геопрозрастной информации, – использование моделей интерполяции, – классификация по набору параметров.</p>	<p>Эксплуатация</p>
<p>2. Банк базовых продуктов (Россия) (https://bbp.ntsomz.ru/) [1а, 1б, II]*</p>  <p>БАНК БАЗОВЫХ ПРОДУКТОВ НАЦИОНАЛЬНОГО ИСЛЕДОВАНИЯ</p>	<p>1) Отслеживание изменений подстилающей поверхности Земли. 2) Построение карт, восстанавливаемых по данным ДЗЗ геофизических параметров. 3) Валидация восстановленных геофизических параметров, описывающих физические объекты и получение исходной устойчивой информации для модели развития различных явлений и процессов. 4) Решение прикладных задач (лесное и сельское хозяйство, морская среда, чрезвычайные ситуации, экология).</p>	<p>– предоставление индексных изображений – продукты специальной обработки данных ДЗЗ стандартных уровней, характеризующие состояние объектов подстилающей поверхности и представленные в производных физических (или псевдофизических) величинах; – предоставление композитных изображений – продукты, формируемые из данных ДЗЗ стандартных уровней на одну территорию интереса за разные даты наблюдения либо от разных сенсоров, характеризующие относительное изменение состояния объектов подстилающей поверхности в пространстве и времени.</p>	<p>Эксплуатация</p>
<p>3. TerraCloud (https://cloud.terratech.ru/) [1а, 1б]*</p>  <p>TerraCloud Онлайн-покупка данных ДЗЗ</p>	<p>1) Возможность приобретения данных ДЗЗ (новая съемка или архив) с российских и иностранных космических аппаратов в одном окне онлайн.</p>	<p>– реализация автоматической цепочки заказа и поставки данных ДЗЗ конечному потребителю, – предоставление комплекта поставки включает данные по международной классификации 2А с сопутствующей информацией.</p>	<p>Эксплуатация</p>

Таблица 1. Продолжение

Название облачной платформы	Назначение и решение прикладных задач	Функционал (информационное наполнение) и подходы к реализации	Степень готовности
4. Геоинтеграционная платформа Геотрон (Россия) (http://geotron.ntsomz.ru/) [Ia, Ib, II, III]*	1) Интеграция открытой, коммерческой и собственной пространственно-распределенной информации в едином геоинформационном пространстве. 2) Облегчение процесса сбора регистровой и актуальной информации о территории и объектах инфраструктуры.	— предоставление многопользовательского доступа к различным видам геоинформационных ресурсов: базам геоданных, картографическим ресурсам и сервисам, 3D-моделям местности и объектов, данным ДЗЗ, — создание, загрузка, хранение, обработка и визуализация геопрозрастной информации из различных источников с учетом собственных данных пользователей.	Эксплуатация
5. Maritime Scanex (Россия) (https://maritime.earth/) [Ib, II, III]* 	1) Оперативный мониторинг навигационной, инженерно-технической и экологической безопасности морских объектов и акваторий, направленный на обеспечение адекватной оценки ситуации в море и быстрого реагирования.	— интеграция технологий обработки и интерпретации оперативных спутниковых данных, алгоритмов моделирования автоматической идентификации судов ведущих мировых поставщиков.	Эксплуатация
6. ЦКП ИКИ-Мониторинг (Россия) (http://skr.geosmis.ru/) [Ib, II]*	1) Возможность архивации, обработки и анализа данных ДЗЗ в интересах РАН. 2) Решение научных и прикладных задач изучения и мониторинга окружающей среды.	— обеспечение доступа к многолетним, постоянно пополняющимся архивам данных ДЗЗ, — возможность обработки и аналитики данных ДЗЗ.	Эксплуатация
7. Решения компании ИнноГеоТех (Россия) (http://innogeotech.ru/solutions/) [Ib, II]* 	1) Единое облачное пространство для хранения и управления пользовательскими геоданными. 2) Оперативный мониторинг и моделирование развития болезней сельскохозяйственных культур. 3) Управление лесным фондом с алгоритмами распознавания.	— импорт и экспорт данных ДЗЗ из разных источников в разных форматах, а также конвертация данных, — первичная и тематическая обработка данных в автоматическом режиме, — визуализация и аналитика данных, — применение обучающих и тестовых наборов данных ДЗЗ и ручной разметки объектов для машинного обучения.	Эксплуатация (внедрение)

Таблица 1. Продолжение


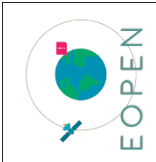


Название облачной платформы	Назначение и решение прикладных задач	Функционал (информационное наполнение) и подходы к реализации	Степень готовности
<p>8. EO VAS (Словения, Австрия) (http://eo-vas.eu/) [Ib, II]*</p> 	<p>1) Ядро платформы Perceptive Sentinel. 2) Идентификация видового состава сельскохозяйственных культур. 3) Мониторинг луговых угодий и определение областей и границ участков.</p>	<p>— обработка технологий машинного обучения на основе данных ДЗЗ, — программная поддержка разработки облачных платформ и предоставления услуг ДЗЗ, — валидация внедряемых технологий.</p>	<p>Проект (ядро проекта PerceptiveSentinel)</p>
<p>9. EOPEX (Италия, Греция) (https://eopen-project.eu) [Ib, II, III]*</p> 	<p>1) Обнаружение изменений подстилающей поверхности Земли. 2) Мониторинг изменений климата.</p>	<p>— применение технологий обработки разновременных и разнородных данных, — предоставление инфраструктуры для поддержки жизненного цикла обработки big data.</p>	<p>Проект</p>
<p>10. CANDELA (EC) (http://www.candela-h2020.eu/) [Ib, II]*</p> 	<p>1) Обнаружение изменений подстилающей поверхности Земли. 2) Мониторинг за стихийными бедствиями, мониторинг лесного хозяйства. 3) Урбанистика и сельское хозяйство.</p>		<p>Проект</p>
<p>11. BETTER (EC) (https://www.ec-better.eu/) [Ib, II]*</p> 	<p>1) Решение социально-экономических проблем, продовольственная безопасность. 2) Мониторинг опасных геологических явлений.</p>		<p>Проект</p>

Таблица 1. Продолжение






Название облачной платформы	Назначение и решение прикладных задач	Функционал (информационное наполнение) и подходы к реализации	Степень готовности
12. CreoDIAS Browser (EC) (https://browser.creodias.eu) [Ia, Ib, II, III, IV, VI]* 	1) Аналитика и визуализация данных. 2) Круг прикладных задач в платформе может быть широким.	– предоставление открытых данных ДЗЗ с КА Sentinel и Landsat (хранилище петабайтного класса), – предоставление готовой аналитики и доступных вычислительных кластеров большой мощности в целях оперативной аналитики и предоставления ее результатов, – оказание услуг, связанных в предоставлении вычислительных мощностей пользователям для обработки и хранения данных ДЗЗ, – предоставление подписок на ряд коммерческих операционных систем и сетевые ресурсы, – для некоторых платформ – предоставление возможностей для разработки собственных сервисов, используя готовый набор библиотек и утилит.	Эксплуатация
13. Mundi (EC) (https://mundiwebseervices.com/) [Ia, Ib, II, III, VI]* 	1) Аналитика и визуализация данных. 2) Круг прикладных задач в платформе может быть широким. 3) Интеграция с атрибутами, не являющимися данными ДЗЗ. 4) Наличие маркетплейса других решений и сервисов.		Эксплуатация
14. Onda (EC) (https://www.onda-dias.eu/) [Ia, Ib, II, III, IV, VI]* 	1) Аналитика и визуализация данных. 2) Круг прикладных задач в платформе может быть широким, с пользовательскими шаблонами (предварительно настроенных виртуальных сред).		Эксплуатация
15. Sobloo (EC) (https://sobloo.eu/) [Ia, Ib, II, III, VI]* 	1) Аналитика и визуализация данных. 2) Круг прикладных задач в платформе может быть широким. 3) Интеграция с атрибутами, не являющимися данными ДЗЗ. 4) Наличие маркетплейса других решений и сервисов.		Эксплуатация
16. Wekeo (EC) (https://www.wekeo.eu/) [Ia, Ib, II, III, IV, VI]* 	1) Аналитика и визуализация данных. 2) Круг прикладных задач в платформе может быть широким. 3) Интеграция с атрибутами, не являющимися данными ДЗЗ.		Эксплуатация

Таблица 1. Продолжение

Название облачной платформы	Назначение и решение прикладных задач	Функционал (информационное наполнение) и подходы к реализации	Степень готовности
17. EOS Platform (США) (https://eos.com/) [Ib, II, III]* 	1) Аналитика и визуализация данных. 2) Круг прикладных задач в платформе может быть широким (22 отрасли экономики).	— поиск, анализ и предоставление данных ДЗЗ, — выполнение аналитики данных ДЗЗ, — визуализация разновременных и разнородных наборов данных, — доступ и управления хранилищем данных.	Опытная эксплуатация
18. Descartes Labs (США) (https://www.descarteslabs.com/) [Ib, II, VI]* 	1) Обработка данных ДЗЗ, обнаружение изменений и тенденций. 2) Решение прикладных задач (сельское хозяйство, энергетика, финансы, лесное хозяйство, страхование, транспорт и др.).	— доступ к глобальным данным — в ретроспективе и в почти реальном масштабе времени, — аналитика данных с использованием искусственного интеллекта, — просмотр в режиме реального масштаба времени изменений и тенденций подстилающей поверхности Земли, аналитика с измерением физических величин, — возможность написания скриптов обработки и манипуляции данными.	Опытная эксплуатация
19. Google Earth Engine (США) (https://earthengine.google.com/) [Ib, II, III, IV]* 	1) Обработка и аналитика подстилающей поверхности Земли в глобальном и локальном масштабах. 2) Решение прикладных задач (аналитика от изменения леса до распределения водных поверхностей, изменений глобального климата и др.).	— обработка и аналитика с применением большого числа инструментария для манипуляции данными ДЗЗ, в том числе с применением технологий искусственного интеллекта, — возможность написания скриптов обработки и манипуляции данными.	Эксплуатация

Таблица 1. Продолжение







Название облачной платформы	Назначение и решение прикладных задач	Функционал (информационное наполнение) и подходы к реализации	Степень готовности
20. Maxar GBDX (США) (https://www.geobigdata.io/) [Ia, Ib, II, III, VI]* 	1) Обработка и аналитика подстилающей поверхности Земли в глобальном и локальном масштабах. 2) Решение прикладных задач (климатология, урбанистика, городское планирование и др.).	— доступ к большому архиву данных ДЗЗ коммерческих операторов Северной Америки, — автоматическая аналитика с получением информационных продуктов, — возможность написания скриптов обработки и манипуляции данными, — аналитика данных с использованием технологий машинного обучения, — интеграция растровых изображений с векторными данными.	Эксплуатация
21. ArcGIS Platform (США) (https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-platform/overview) [Ib, II, III, IV]* 	1) Обработка и анализ подстилающей поверхности Земли в глобальном и локальном масштабах. 2) Круг прикладных задач в платформе может быть широким.	— создание, публикация и запуск скриптов для изучения и управления данными, а также для выполнения административных задач, — возможность написания скриптов обработки и манипуляции данными.	Эксплуатация
22. Planet (США) (https://www.planet.com/products/platform/) [Ia, Ib, II, III, IV, VI]* 	1) Обработка и анализ подстилающей поверхности Земли. 2) Круг прикладных задач в платформе может быть широким.	— предоставление инфраструктуры для обработки больших объемов данных ДЗЗ, включая контейнеризацию, выделенную облачную инфраструктуру, — визуализация практически в реальном масштабе времени разновременных и разнородных наборов данных, — возможность написания скриптов обработки и манипуляции данными.	Эксплуатация

Таблица 1. Окончание

Название облачной платформы	Назначение и решение прикладных задач	Функционал (информационное наполнение) и подходы к реализации	Степень готовности
<p>23. Perceptive Sentinel (США) (http://www.perceptivesentinel.eu/) [Ia, Ib, II, III]*</p> 	<p>1) Обработка и анализ подстилающей поверхности Земли. 2) Круг прикладных задач в платформе может быть широким. 3) Многопрофильный разработчик в области ДЗЗ. 4) Решение проблем обработки big data, машинного обучения.</p>	<p>— предоставление механизма обработки и интерпретации мультиспектральных и разновременных данных ДЗЗ, — аналитика данных с использованием технологий потокового машинного обучения.</p>	<p>Проект</p>
<p>24. Pixel Information Expert (PIE) (Китай) (http://www.piesat.cn) [Ia, Ib, II, III, V]*</p> 	<p>1) Обработка данных и аналитика подстилающей поверхности Земли. 2) Круг прикладных задач в платформе может быть широким.</p>	<p>— предоставление инфраструктуры для обработки больших объемов данных ДЗЗ, — предоставление возможности интеграции различных данных ДЗЗ.</p>	<p>Эксплуатация</p>
<p>25. Bhuvan (Indian Geo-Platform of ISRO) (Индия) (https://bhuvan.nrsc.gov.in) [Ia, Ib, II, III]*</p> 	<p>1) Представление готовых информационных продуктов и анализ подстилающей поверхности территории Индии и сопредельных территорий (Индийский океан), для части продуктов – в глобальном масштабе. 2) Решение прикладных задач (сельское хозяйство, лесное хозяйство, гидрология, геоморфология, туризм, урбанистика и др.).</p>	<p>— аналитика данных ДЗЗ из разных источников (операторы ДЗЗ, в основном с индийских КА ДЗЗ), — предоставление возможности интеграции различных данных ДЗЗ.</p>	<p>Эксплуатация</p>

* Расшифровка классов платформ приводится в тексте статьи.

поверхности Земли, применение технологий компьютерного зрения, возможность извлечения характеристик идентифицируемых объектов подстилающего поверхности).

Облачная платформа Decartes Labs обеспечивает доступ к данным ДЗЗ с отслеживанием изменений и тенденций подстилающей поверхности Земли, возможна обработка данных с использованием искусственного интеллекта. Аналогичный функционал имеет платформа EOS Platform, в ее составе входят готовые тематические решения для различных отраслей экономики.

Среди реализованных облачных платформ в сфере ДЗЗ в странах БРИКС можно выделить Píxel Information Expert (Китай) и Bhuvan (Индия), их создание произошло несколько позже европейских и американских, и в настоящее время развитие идет стремительными темпами, что главным образом связано с развертыванием собственных орбитальных группировок ДЗЗ.

К российским платформам условно можно отнести Геоаналитика.Агро (Мышляков, Глотов, 2014) и Банк базовых продуктов (Васильев и др., 2015; Марков и др., 2016). Программно-аппаратная составляющая Банка базовых продуктов обеспечивается развертыванием виртуальных машин на базе серверной инфраструктуры и применением вычислительных модулей параллельной обработки (Марков и др., 2016), что несколько отличается от других рассматриваемых облачных платформ.

В части предоставления данных ДЗЗ можно выделить онлайн-сервис покупки данных ДЗЗ с российских и иностранных космических аппаратов TerraCloud (АО "Терра Тех").

К платформе с поддержкой интеграции открытой, коммерческой и собственной пространственно-распределенной информации в единой геоинформационной среде можно отнести географическую интеграционную платформу (ГИП) "Геотрон" (Серебряков, 2019).

В целях решения задач мониторинга навигационной, инженерно-технической и экологической безопасности морских объектов и акваторий разработан набор сервисов Морской портал компании "Сканэкс" (Maritime Scanex). Компанией "ИнноГеоТех" совместно с ведущими организациями в сферах ГИС и ДЗЗ внедряются проекты, начиная от облачной платформы для решения задач общего назначения (хранение, обработка, визуализация и анализ) и заканчивая тематическими сервисами мониторинга в области сельского хозяйства и управления лесным фондом.

Среди крупнейших российских проектов следует выделить Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды "ЦКП ИКИ-Мониторинг" (Лупян и др., 2019).

ТИПОВАЯ СТРУКТУРА ОБЛАЧНЫХ ПЛАТФОРМ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЗЗ

В выделении типовой структуры облачной платформы применяется методологический подход абстрагирования в процессе анализа от несущественных сторон, свойств, связей объекта (предмета или явления) в целях выделения их существенных, закономерных признаков. Данный подход применяется по причине большого числа различающихся технических решений при разработке платформ в зависимости от масштаба и специфики решаемых задач.

В целом в типовой структуре выделены пять слоев, реализующих логику связанных групп средств и функциональных задач, соединенных интерфейсами (рис. 1): слой сервиса, слой бизнес-логики, слой вычислительной среды, слой облачной инфраструктуры, слой вычислительных ресурсов. Преимуществом данной структуры является то, что пользователь отделен от аппаратно-программных средств трех нижних слоев платформы, обеспечивая принцип инкапсуляции, т.е. система скрывает от пользователя процессы управления и распределения вычислительных ресурсов.

Деление на слои обусловлено основополагающим принципом программной инженерии – разделением ответственности (separation of concerns) (Dijkstra, 1982; (Reade, 1989), представляющим собой процесс разделения облачной платформы на функциональные блоки, как можно меньше перекрывающие функции друг друга:

– слой сервиса представляет собой среду оказания ряда услуг по аналитике, по предоставлению данных ДЗЗ и информационных продуктов на их основе, непосредственно взаимодействующую с пользователями и реализуемую в виде веб-приложения (HTML, CSS, JavaScript, PWA и др.) и сервисов (Jupyter и др.);

– слой бизнес-логики содержит внутреннюю логику функционирования в прикладном плане, программную составляющую кроссплатформенных библиотек абстракции и преобразования геопространственных данных и формирования результата обработки. Слой также реализует функции редактора пользовательских скриптов обработки, анализа, используя средства клиентских библиотек и инструментов (GDAL, GeoTools, PostGIS и др.) и API (REST), обеспечивая гибкий характер одного или нескольких сервисов под переменные требования пользователей. Слои сервиса и бизнес-логики охватывают клиентскую сторону облачной платформы (frontend), обращенную к пользователю;

– слой вычислительной среды содержит программно определяемые виртуальные кластеры (система управления кластерами, распределенные базы данных, файловая система и др.), кото-

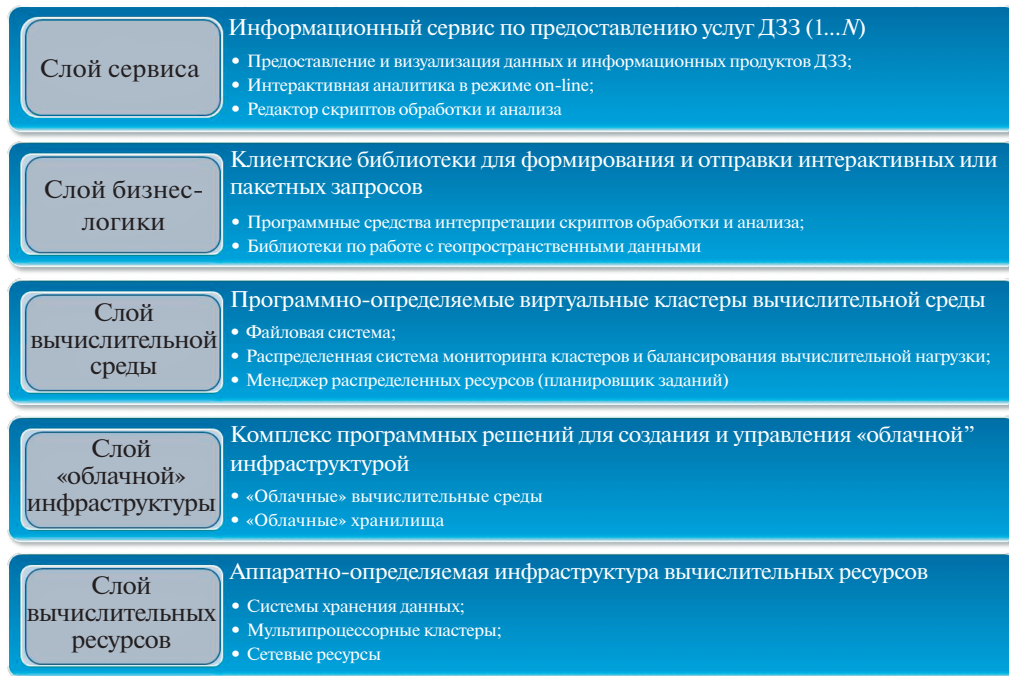


Рис. 1. Типовая структура облачных платформ обработки и аналитики данных ДЗЗ.

рые управляют выделением и распределением вычислительных мощностей для выполнения процессов в слое бизнес-логики, обеспечивая возможность их мониторинга и балансировки вычислительной нагрузки (средства VMware, RHV, Docker, GlusterFS, Ceph и др.);

– слой облачной инфраструктуры обеспечивает сетевой доступ к общему фонду конфигурируемых вычислительных ресурсов, которые могут быть оперативно предоставлены и освобождены с минимальными эксплуатационными затратами (средства: VMware, OpenStack и др.; решения: AWS, Google Cloud Platform, Azure и др.);

– слой вычислительных ресурсов отражает аппаратно-определяемую инфраструктуру, состоящую из физических элементов аппаратной части облачной платформы, то есть мультипроцессорные кластеры, системы хранения данных и сетевые ресурсы. Три нижние слоя платформы относятся к программно-аппаратной части (back-end).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Многослойное представление типовой структуры облачных платформ обладает рядом достоинств: создаются условия автономной разработки и горизонтальной масштабируемости отдельных слоев. Разделение на слои позволяет снизить системную сложность разработки и обслуживания, повысить надежность и гибкость облачных платформ, обеспечить возможность их повторного использования и модернизации. Проблемы инте-

грации между слоями решаются путем разработки и настройки интерфейсов. Также в рамках типовой структуры возможно создание нескольких сервисов в соответствии с матрицей целевых задач ДЗЗ (Борисов и др., 2013) на основе единой платформы.

К преимуществам облачных платформ, определяющим перспективы их дальнейшего использования, можно отнести:

– работу с “кубами данных” (сверхбольшие объемы данных в пространственной, временной и спектральной гранях представления) от различных поставщиков и операторов данных ДЗЗ;

– освобождение пользователей от необходимости вложений в инфраструктуру и применения специальных знаний по разработке ИТ-решений, не относящихся к основной деятельности пользователей;

– возможность применения единых стандартов обработки данных ДЗЗ и поддержания уровня достоверности предоставляемых информационных продуктов за счет аккумуляции этих процессов в инфраструктуре платформы;

– рост числа пользователей за счет простоты использования в едином интерфейсе открытых данных ДЗЗ, их продуктов и аналитики, готовой к использованию;

– возможность интеграции ГИС-сервисами (например ArcGIS, QGIS);

– универсальность и гибкость технологий, возможность быстрого масштабирования.

Реализация интеграции облачных платформ с такими распространенными ГИС-средствами, как ArcGIS, QGIS и др., возможна путем внесения изменений в слое бизнес-логики.

В сформированной типовой структуре не отражается разнообразие технических решений при разработке и сложность разработки интерфейсов между слоями структуры (отсутствие принятых стандартов). Чем больше степень абстракции слоев (функциональных возможностей) предоставляется пользователю, тем труднее обеспечивается формализация подходов к хранению, обработке и аналитике данных.

К сдерживающим факторам развития облачных платформ можно отнести такие системные проблемы, как малое количество разработчиков, обладающих междисциплинарным опытом разработки систем, и их слабая вовлеченность в проекты, а также трудность продвижения платформ на рынок. Решение данной проблемы просматривается в создании профессионального сообщества путем проведения специальных мероприятий (конкурсов и “хакатонов”) с целью выявления потенциальных разработчиков и их набора в проекты облачных платформ. Представляется целесообразным расширенное взаимодействие с пользователями по адаптации и автоматизации создаваемых сервисов для обеспечения достоверности и оперативности процедур обработки, эргономике пользовательского интерфейса.

Существенным барьером является слабое взаимодействие с производителями космических аппаратов. В части целевой аппаратуры имеет место отсутствие информации об ее дефектах и состоянии, отклонениях целевых характеристик оптико-электронного комплекса в процессе эксплуатации, что очень важно для формирования информационных продуктов с достаточной степенью достоверности измеряемых физических параметров. Выход из данного положения возможен при сближении участников в сфере ДЗЗ (разработчики космических аппаратов, операторы по предоставлению данных ДЗЗ и пользователи), когда в ходе открытого обсуждения формируется консенсус по вопросам системы генерации данных и информационных продуктов.

Современные технические решения (облачные технологии и виртуализация) в рамках платформ являются эффективным способом перехода к новому технологическому укладу, который снимает необходимость масштабных капитальных вложений в разработку программных и инфраструктурных компонентов за счет динамического масштабирования нагрузки (сервисная модель предоставления услуг “по требованию”). Следствием этого является интенсификация использования доступных ресурсов наземной космической инфраструктуры ДЗЗ и росту эффективности ее использования.

Таким образом, в облачной платформе могут быть реализованы следующие возможности, недоступные в настольном программном обеспечении:

- гибкое использование технологий облачных вычислений на основе масштабируемости и распределения вычислительных ресурсов;
- консолидация хранения сверхбольших массивов данных ДЗЗ, результатов их обработки и единый доступ к ним;
- минимальный уровень вовлечения пользователя во внутренние процессы, не связанные с предоставлением услуг (инсталляция, настройка и т.д.);
- централизованное обслуживание и проведение регламентных работ;
- снижение накладных расходов, как и со стороны разработчиков, так и со стороны пользователей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенного обзора 25 облачных платформ можно сделать вывод о том, что на фоне смещения потребительского интереса от получения данных ДЗЗ первичных (стандартных) уровней обработки к использованию виртуальной среды применения данных и продуктов ДЗЗ, подобные платформы становятся наиболее перспективным и востребованным форматом взаимодействия дистрибьюторов данных ДЗЗ с различными категориями пользователей.

Системная сложность технической реализации облачных платформ привела к необходимости декомпозиции их структуры с выделением функциональных слоев. В ходе исследования предложена типовая структура облачной платформы, в которой каждый слой может развиваться самостоятельным образом и интегрироваться через универсальные веб-интерфейсы ОГС. Наиболее важными слоями для развития конкурентоспособности платформ являются слой сервиса и слой бизнес-логики.

К достоинствам многослойной реализации облачных платформ можно отнести создание условий автономной разработки, стандартизации и горизонтальной масштабируемости отдельных слоев. Недостатком является зависимость от многовариантности технических решений при их разработке. К основным системным проблемам развития облачных платформ можно отнести трудности продвижения платформ на рынке, а также малое количество разработчиков, обладающих необходимым опытом разработки систем такого класса.

Облачные технологии в ДЗЗ являются основным способом перехода к новому технологическому укладу, что потенциально за счет реализации сервисной модели предоставления услуг “по

требованию” может способствовать значительно-му расширению круга потребителей и решаемых прикладных задач на основе данных и продуктов ДЗЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисов А.В., Емельянов А.А., Емельянова В.Г.* Матрица целевых задач как информационная основа для определения перспективных направлений развития индустрии дистанционного зондирования Земли // Космонавтика и ракетостроение. 2013. Вып. 4(73). С. 61–68.
- Васильев А.И., Коршунов А.А., Ольшевский Н.А., Стрёмов А.С.* Программные технологии создания и распространения базовых продуктов дистанционного зондирования Земли // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2. № 3. С. 23–32.
- Емельянов А.А., Сизов О.С., Цымбарович П.Р., Ерешко М.В.* Предпосылки, задачи и преимущества перехода к цифровой экосистеме дистанционного зондирования Земли // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. Москва: ИКИ РАН, 2020. С. 433.
<https://doi.org/10.21046/18DZZconf-2020a>
- Луян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашицкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП “ИКИ-Мониторинг”) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170>
- Марков А.Н., Васильев А.И., Ольшевский Н.А., Коршунов А.П., Михаленков Р.А., Салимонов Б.Б., Стрёмов А.С.* Архитектура геoinформационного сервиса “Банк базовых продуктов” // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 39–51.
- Мышляков С.Г., Готов А.А.* “Геоаналитика.Агро” – инновационное решение для сельскохозяйственного мониторинга // Геоматика. 2015. № 2. С. 58–62.
- Райзман Ю.Г.* Geoscloud – облачное решение для работы с геoinформацией // Геопрофи. 2019. № 5. С. 38–41.
- Серебряков В.Б.;* заявитель и правообладатель АО “Российские космические системы”. – № 2018664897; заявл. 21.12.2018; опубл. 10.01.2019. – 1 с. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019610273 Российская Федерация. Геоинтеграционная платформа “Геотрон”.
- Тюлин А.Е., Чурсин А.А., Элердова М.А., Юдин А.В.* Создание радикально новой продукции и ее коммерциализация // Креативная экономика. 2020. Т. 14. № 7. С. 1257–1278.
<https://doi.org/10.18334/ce.14.7.110697>
- Хайлов М.Н., Заичко В.А.* Направления и пути развития Российской системы ДЗЗ из космоса в современных условиях (развитие орбитальной группировки и наземной инфраструктуры) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы XVI Всероссийской открытой конференции, Москва, ИКИ РАН, 12–16 ноября 2018 г. / ИКИ РАН. Москва, 2018. С. 9.
- Jeff de La Beaujardiere.* A Geodata Fabric for the 21st Century. 2019. [Электронный ресурс] URL: <https://doi.org/10.1029/2019EO136386> (дата обращения: 16.01.2021).
- Edsger W. Dijkstra.* Selected Writings on Computing: A Personal Perspective // Springer-Verlag. New York. 1982. P. 60–66.
- Evangelidis K., Ntouros K., Makridis S., and Papatheodorou C.* Geospatial services in the Cloud // Computers & Geosciences. 2014. V. 63. P. 116–122.
- Gregory Giuliani, Gilberto Camara, Brian Killough and Stuart Minchin.* Earth Observation Open Science: Enhancing Reproducible Science Using Data Cubes // 2019. V. 4. P. 1–6. [Электронный ресурс] URL: <https://doi.org/10.3390/data4040147> (дата обращения: 16.01.2021).
- Vitor C. F. Gomes, Gilberto R. Queiroz, and Karine R. Ferreira.* An Overview of Platforms for Big Earth Observation Data Management and Analysis. Remote Sens. 2020. 12(8). 1253; <https://doi.org/10.3390/rs12081253>
- Noel Gorelick, Matt Hancher, Mike Dixon, Simon Piyushchenko, David Thau and Rebecca Moore.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 202. P. 18–27.
- Grossner K.E., Goodchild M.F., Clarke K.C.* Defining a Digital Earth System // Transactions in GIS. 2008. V. 12. Iss. 1. P. 145–160.
- Manfred Kruschke, Ursula Benz.* The Emergence of the Geo-Sharing Economy // Earth Observation Open Science and Innovation. 2018. P. 255–260.
- Lü XueFeng, ChengQi Cheng, JainYa Gong and Li Guan.* Review of data storage and management technologies for massive remote sensing data // Sci. China Technol. Sci. 2011. V. 54. № 12. P. 3220–3232.
- Mell P., Grance T.* The NIST definition of cloud computing: Recommendations of the National Institute of Standards and Technology // Public Cloud Comput. Secur. Priv. Guidel. 2012. P. 97–101.
- Chris Reade. Elements of Functional Programming // Addison-Wesley. 1989. 600 p.
- Michael Schmidt.* The German Copernicus Data and Exploitation platform “CODE-DE” as part of the Collaborative Ground Segment. [Электронный ресурс] URL: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/3962826/Germany-CollGS-October-2019.pdf> (дата обращения: 16.01.2021).
- Tobias Storch, Christoph Reck, Stefanie Holzwarth, Bert Wieggers, Nico Mandery, Ulrich Raape, Christian Strobl, Rouven Volkmann, Martin Böttcher, Andreas Hirner, Johanna Senft, Nicolae Plesia, Thomas Kukuk, Stephan Meissl, Jens-Rainer Felske, Thomas Heege, Vanessa Keuck, Michael Schmidt and Helmut Staudenrausch.* Insights into CODE-DE – Germany’s Copernicus data and exploitation platform // Big Earth Data. 2019. V. 3. Iss. 4. P. 338–361.
- OGC, ISO I. A Guide to the Role of Standards in Geospatial Information Management // 2014. № August. P. 1–27.

Review of Current Cloud Platforms for Processing and Analyzing Remote Sensing Data and Information Products Based on Them

A. A. Emelyanov¹, M. V. Ereshko¹, O. S. Sizov¹, and A. V. Borisov¹

¹Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russia

The active development of the orbital constellation of remote sensing satellites has led to the accumulation of large volumes remote sensing data, which require the innovative approaches to organizing storage and ready access to them for real-time analytics. Against the background of the reorientation of consumer interest from obtaining remote sensing data of primary (standard) processing levels to using an integrated virtual environment for using remote sensing data and products, the most perspective and requested format for interacting with various categories of users is a cloud platform for processing and analyzing remote sensing data (cloud platform). The existing variety of cloud platforms makes it difficult for users to understand of the internal structure and connectivity of the constituent elements in terms of functional and consumer properties, which leads to the need for their scientific systematization. The article presents the results of overview analysis of foreign and Russian cloud platforms. A generic structure of the cloud platform is highlighted, each layer of which has its own character of functioning, autonomy, standardization and horizontal scalability. The results of the review showed that cloud platforms are the most promising direction in the development of means for processing and analyzing remote sensing data.

Keywords: cloud platform, Earth remote sensing, Earth science, big data, cloud technologies

REFERENCES

- Borisov A.V., Emel'yanov A.A., Emel'yanova V.G.* Matritsa tselevykh zadach kak informatsionnaya osnova dlya opredeleniya perspektivnykh napravlenii razvitiya industrii distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Matrix of target tasks as an information basis for the determination of the promising trends of Earth remote sensing industry development] // *Kosmonavtika i raketostroenie*. 2013. № 4(73). P. 61–68. (In Russian)
- Vasil'ev A.I., Korshunov A.A., Ol'shevskii N.A., Stremov A.S.* Programmnye tekhnologii sozdaniya i rasprostraneniya bazovykh produktov distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Software technologies for the creation and distribution of basic products of Earth remote sensing] // *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*. 2015. V. 2. № 3. P. 23–32. (In Russian)
- Emel'yanov A.A., Sizov O.S., Tsymbarovich P.R., Ereshko M.V.* Predposylki, zadachi i preimushchestva perekhoda k tsifrovoy ehkositeme distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Prerequisites, challenges and benefits of transition to a digital ecosystem of Earth remote sensing] // *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”*. Moskva: IKI RAN, 2020. P. 433. <https://doi.org/10.21046/18DZZconf-2020a> (access date: 16.01.2021) (In Russian)
- Lupyan E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Mazurov A.A., Marchenkov V.V., Matveev A.M., Radchenko M.V., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A.* Opyt ehksploatatsii i razvitiya tsentra kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh (TSKP “IKI-Monitoring”) [Experience in the operation and development of a shared use center for archiving, processing and analysis of satellite data (TSKP “IKI-Monitoring”)] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. V. 16. № 3. P. 151–170. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170> (access date: 16.01.2021) (In Russian)
- Markov A.N., Vasil'ev A.I., Ol'shevskii N.A., Korshunov A.P., Mikhalenikov R.A., Salimonov B.B., Stremov A.S.* Arkhitektura geoinformatsionnogo servisa “Bank bazovykh produktov” [Architecture of the geoinformation service “Basic Products Bank”] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. V. 13. № 5. P. 39–51. (In Russian)
- Myshlyakov S.G., Glotov A.A.* “Geoanalitika. Agro” – innovatsionnoe reshenie dlya sel'skokhozyaistvennogo monitoringa [“Geoanalytics. Agro” – an innovative solution for agricultural monitoring] // *Geomatika*. 2015. № 2. P. 58–62. (In Russian)
- Raizman YU.G.* Geocloud – oblachnoe reshenie dlya raboty s geoinformatsiei [Geocloud is a cloud-based solution for working with geoinformation] // *Geoprofi*. 2019. № 5. P. 38–41. (In Russian)
- Serebryakov V.B.*; zayavitel' i pravoobladatel' AO “Rossiiskie kosmicheskie sistemy”. – № 2018664897; zayavl. 21.12.2018; opubl. 10.01.2019. – 1 s. / Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EHVM 2019610273 Rossiiskaya Federatsiya. Geointegratsionnaya platforma “Geotron”. (In Russian)
- Tyulin A.E., Chursin A.A., Ehlerdova M.A., Yudin A.V.* Sozdanie radikal'no novoi produktsii i ee kommertsializatsiya [Creation of radically new products and their commercialization] // *Kreativnaya ehkonomika*. V. 14. № 7. P. 1257–1278. <https://doi.org/10.18334/ce.14.7.110697> (access date: 16.01.2021) (In Russian)
- Khailov M.N., Zaichko V.A.* Napravleniya i puti razvitiya Rossiiskoi sistemy DZZ iz kosmosa v sovremennykh usloviyakh (razvitie orbital'noi gruppirovki i nazemnoi infrastruktury) [Directions and ways of development of the Russian remote sensing system from space in modern conditions (development of the orbital constellation and ground infrastructure)] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa: materialy XVI Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii, Moskva, IKI RAN, 12–16 noyabrya 2018 g.* / IKI RAN. Moskva, 2018. P. 9. (In Russian)
- Jeff de La Beaujardiere.* A Geodata Fabric for the 21st Century. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019EO136386> (access date: 16.01.2021).
- Edsger W. Dijkstra.* Selected Writings on Computing: A Personal Perspective // Springer-Verlag. New York. 1982. P. 60–66.

- Evangelidis K., Ntouros K., Makridis S., and Papatheodorou C.* Geospatial services in the Cloud // *Computers & Geosciences*. 2014. V. 63. P. 116–122.
- Gregory Giuliani, Gilberto Camara, Brian Killough and Stuart Minchin.* Earth Observation Open Science: Enhancing Reproducible Science Using Data Cubes // 2019. V. 4. P. 1–6. <https://doi.org/10.3390/data4040147> (access date: 16.01.2021).
- Vitor C. F. Gomes, Gilberto R. Queiroz, and Karine R. Ferreira.* An Overview of Platforms for Big Earth Observation Data Management and Analysis. *Remote Sens.* 2020. 12(8). 1253. <https://doi.org/10.3390/rs12081253>
- Noel Gorelick, Matt Hancher, Mike Dixon, Simon Ilyushchenko, David Thau and Rebecca Moore.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 202. P. 18–27.
- Grossner K.E., Goodchild M.F., Clarke K.C.* Defining a Digital Earth System // *Transactions in GIS*. 2008. V. 12. Iss. 1. P. 145–160.
- Manfred Krischke, Ursula Benz.* The Emergence of the Geo-Sharing Economy // *Earth Observation Open Science and Innovation*. 2018. P. 255–260.
- Lü XueFeng, ChengQi Cheng, JainYa Gong and Li Guan.* Review of data storage and management technologies for massive remote sensing data // *Sci. China Technol. Sci.* 2011. V. 54. № 12. P. 3220–3232.
- Mell P., Grance T.* The NIST definition of cloud computing: Recommendations of the National Institute of Standards and Technology // *Public Cloud Comput. Secur. Priv. Guidel.* 2012. P. 97–101.
- Chris Reade.* *Elements of Functional Programming* // Addison-Wesley. 1989. 600 p.
- Michael Schmidt.* The German Copernicus Data and Exploitation platform “CODE-DE” as part of the Collaborative Ground Segment. [Электронный ресурс] URL: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/3962826/Germany-CollIGS-October-2019.pdf> (access date: 16.01.2021).
- Tobias Storch, Christoph Reck, Stefanie Holzwarth, Bert Wieggers, Nico Mandery, Ulrich Raape, Christian Strobl, Rouven Volkmann, Martin Bottcher, Andreas Hirner, Johanna Senft, Nicolae Plesia, Thomas Kukuk, Stephan Meissl, Jens-Rainer Felske, Thomas Heege, Vanessa Keuck, Michael Schmidt and Helmut Staudenrausch.* Insights into CODE-DE – Germany’s Copernicus data and exploitation platform // *Big Earth Data*. 2019. V. 3. Iss. 4. P. 338–361.
- OGC, ISO I. A Guide to the Role of Standards in Geospatial Information Management // 2014. № August. P. 1–27.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ДУХКАНАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ НАД МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПО ДАННЫМ ПРИБОРА МСУ-МР СПУТНИКА “МЕТЕОР-М” № 2

© 2022 г. М. О. Кучма^а, *, Е. И. Холодов^а, Ю. А. Амельченко^а

^аДальневосточный центр Федерального государственного бюджетного учреждения
“Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”, Хабаровск, Россия

*E-mail: m.kuchma@dvrspod.ru

Поступила в редакцию 13.09.2021 г.

В настоящей работе рассматривается задача определения аэрозольной оптической толщины над морской поверхностью по данным коротковолновых каналов многозонального сканирующего устройства малого разрешения космического аппарата “Метеор-М” № 2. Представленный алгоритм основан на использовании оптической модели, в качестве которой выступает шестимерная справочная таблица, содержащая информацию о коэффициентах спектральной яркости каналов спутникового прибора для различных атмосферных условий и геометрии наблюдений. Проведена валидация результатов, показавшая корреляцию 80% с эталонными данными сети измерений AERONET.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, аэрозоль, аэрозольная оптическая толщина, МСУ-МР, справочная таблица, AERONET

DOI: 10.31857/S0205961422020051

ВВЕДЕНИЕ

Аэрозоли играют важную роль в формировании регионального и глобального климата за счет взаимодействия с солнечным излучением и облачностью. Сложность исследований аэрозоля обусловлена разнообразием его дисперсного и химического состава, процессов возникновения, рассеяния и поглощения. Для лучшего понимания свойств аэрозоля активно разрабатываются системы регулярных долгосрочных измерений аэрозольной оптической толщины (далее – АОТ) во всех континентальных регионах планеты. АОТ является важной составляющей при оценке климатических изменений, например, изменений температуры подстилающей поверхности (Асарин и др., 2014), а также приходящей суммарной солнечной радиации (Stocker et al., 2013).

Важную роль в увеличении количества и качества регулярных измерений АОТ играют разработанные методы его восстановления по спутниковым наблюдениям, которые необходимо развивать, в том числе, и для новых космических аппаратов (далее – КА). В настоящее время российская группировка полярно-орбитальных КА состоит из двух аппаратов – “Метеор-М” № 2 и “Метеор-М” № 2-2, а до 2024 года предполагается наличие на орбите уже шести КА этой серии.

АОТ, получаемая по спутниковым данным КА серии “Метеор-М”, необходима, в том числе, для проведения атмосферной коррекции коротковолновых каналов многозонального сканирующего устройства малого разрешения (МСУ-МР) (Kuchma, Bloshchinskiy, 2020), установленного на этих КА.

Проблема в настоящее время заключается в отсутствии подхода к определению параметра АОТ по данным МСУ-МР. В рамках настоящей работы впервые представлен метод определения параметра АОТ над морской поверхностью по данным МСУ-МР российского КА “Метеор-М” № 2.

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

Наиболее распространенными методами расчета АОТ над морской поверхностью на сегодняшний день являются алгоритмы для спутниковых приборов VIIRS и MODIS, установленных на КА Suomi NPP/NOAA-20 и TERRA/AQUA соответственно (Ray, 2014; Levy et al., 2009). Для расчета АОТ над морской поверхностью по данным VIIRS используются данные каналов с центральными длинами волн 0.67, 0.74, 0.86, 1.24, 1.62 и 2.25 мкм, по данным MODIS – 0.47, 0.55, 0.66, 0.86, 1.2, 1.6 и 2.12 мкм. Ввиду отсутствия у прибора МСУ-МР некоторых из перечисленных кана-

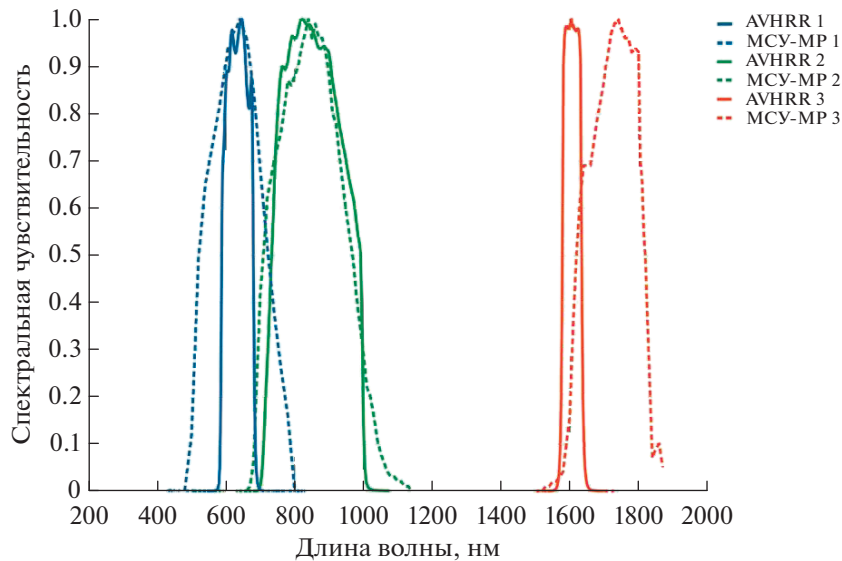


Рис. 1. Функции спектральной чувствительности коротковолновых каналов МСУ-МР и AVHRR.

лов, эти алгоритмы невозможно использовать для решения данной задачи.

Для реализации методики восстановления АОТ применимо использование алгоритма (Zhao, 2017), который используется в оперативной практике National Centers for Environmental Information для построения суточных композитных карт АОТ над морской поверхностью по данным прибора AVHRR, установленного на КА серии NOAA и MetOp. Функции спектральной чувствительности коротковолновых каналов прибора МСУ-МР и прибора AVHRR имеют сходство (рис. 1), что также подтверждает возможность применения этой методики определения АОТ применительно к данному прибору МСУ-МР.

Суть данного алгоритма заключается в использовании справочных таблиц (LUT), представляющих собой смоделированные измерения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в каналах спутникового прибора с центральными длинами волн 0.63, 0.83 и 1.61 мкм для различных значений АОТ морского аэрозоля с учетом атмосферных условий, геометрии наблюдения и освещения. Смоделированные значения КСЯ из LUT для конкретной схемы наблюдений сопоставляются с измерениями в каналах спутникового прибора. С помощью метода минимизации среднеквадратической невязки между рассчитанными и измеренными КСЯ осуществляется конкретный выбор значений АОТ.

СОЗДАНИЕ СПРАВОЧНОЙ ТАБЛИЦЫ

Так как функции спектральной чувствительности коротковолновых каналов прибора МСУ-МР широкие (см. рис 1), то они перекрывают часть

электромагнитного спектра, в котором молекулы озона и водяного пара имеют сильные полосы поглощения (Тимофеев, Васильев, 2007) (рис. 2). В результате чего происходит ослабление регистрируемого в каналах спутникового прибора электромагнитного излучения.

Из этого следует, что для учета общего содержания этих параметров необходимо использовать шестимерную LUT таблицу, в которой присутствуют различные значения водяного пара и озона, задаваемые в модели переноса излучения 6S (Vermote et al, 1997).

С использованием быстрой радиационной модели на основе программного кода DISORT (Buras et al., 2011), входящего в состав библиотеки libradtra (Emde et al., 2016), был произведен расчет КСЯ в коротковолновых каналах прибора МСУ-МР для морской поверхности. Расчет проводился для различной геометрии наблюдения при зенитном угле Солнца 40 градусов. Согласно полученным результатам (рис. 3), при совпадении угла наблюдения спутникового прибора с зенитным углом Солнца, наблюдается возрастание значения КСЯ, самое большое из которых в первом канале — почти на 100% больше, чем средние значения по всем углам. Поэтому в данной работе при восстановлении АОТ использовались только два канала МСУ-МР — каналы № 2 и № 3.

Для моделирования значений КСЯ, которые должны быть зарегистрированы спутниковым прибором в каналах МСУ-МР, с помощью 6S задавалась ряд параметров: функция спектральной чувствительности канала с шагом 0.025 мкм, КСЯ чистой водной поверхности, тип аэрозоля “Maritime”, предопределенный в 6S, углы наблюдения

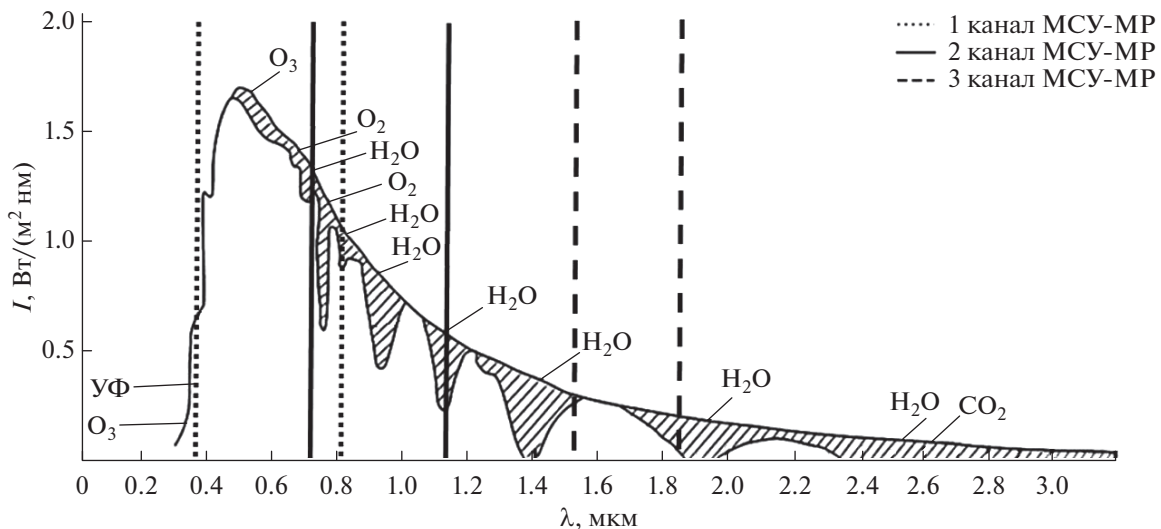


Рис. 2. Спектры солнечного излучения, приходящего на верхнюю границу атмосферы и на поверхность Земли.

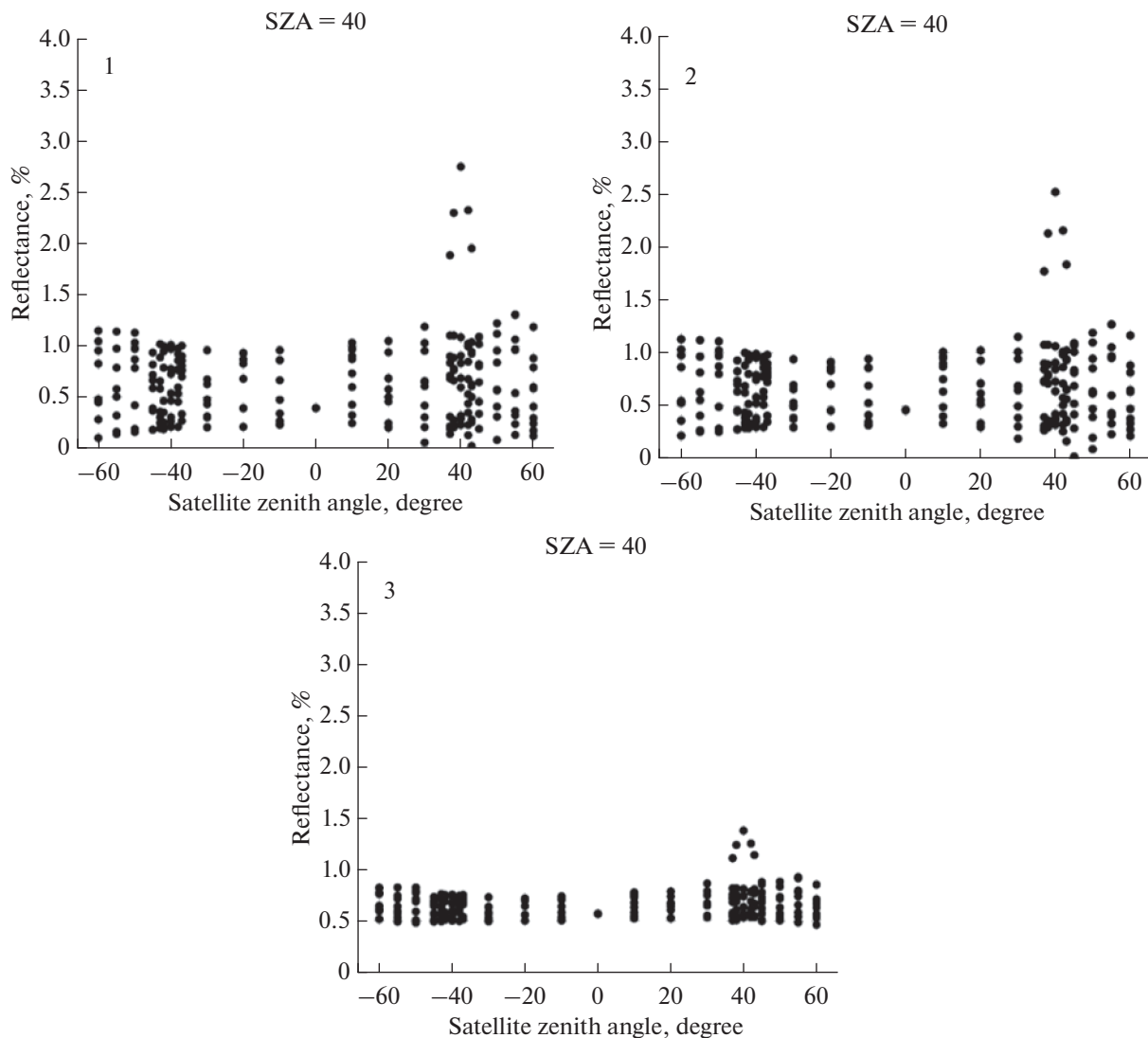


Рис. 3. Расчет КСЯ для морской поверхности для каналов прибора МСУ-МР: 1 – канал № 1; 2 – канал № 2; 3 – канал № 3.

Таблица 1. Параметры при создании LUT-таблицы

Параметр	Количество	Значения
Зенитный угол Солнца (град.)	9	0, 25, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 85
Зенитный угол спутника (град.)	8	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 65
Относительный азимутальный угол (град.)	4	0, 60, 120, 180
Озон (DU)	6	220, 270, 300, 350, 400, 600
Водяной пар (cm)	8	0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.5, 10.0
АОТ	11	0.0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.5, 0.7, 1.3, 5.0

и освещения, содержание озона и водяного пара, а также значения АОТ, которая в модели 6S определена только на длине волны 550 нм. С использованием 6S было установлено, что КСЯ чистой водной поверхности составляет 0.00379 и 0.0001 для каналов № 2 и № 3 прибора МСУ-МР соответственно. Для всех этих параметров в определенном диапазоне составлялись дискретные наборы значений (табл. 1), для каждой возможной комбинации которых запускалось моделирование. Результатом моделирования 6S является значение КСЯ на верхней границе атмосферы.

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ АОТ

При реализации алгоритма получения АОТ данные об углах Солнца и наблюдения рассчитываются по имеющейся информации о положении КА “Метеор-М” № 2 в момент съемки. Данные о содержании водяного пара и озона извлекаются из прогностической модели GFS (Global Forecast System). Для совмещения времени съемки и данных модели применяется интерполяция по времени с использованием оптического потока (Симоненко и др., 2017). АОТ рассчитывается только для безоблачных пикселей, определенных по маске облачности (Андреев и др., 2019). В зимний период, помимо маски облачности, для выделе-

ния чистой воды ото льда используется маска ледяного покрова (Кучма и др., 2021).

Ввиду того, что коэффициент зеркального отражения солнечного света от поверхности океана (ρ_{gl}) влияет на точность восстановления АОТ (чем меньше угол отражения, тем больше регистрируемое излучение), необходимо производить его коррекцию для каждого из коротковолновых каналов прибора МСУ-МР, прошедших предварительную интеркалибровку (Филей и др., 2016). Стоит отметить, что ρ_{gl} является одним из составляющих коэффициента отражения поверхности океана $\rho_{os}(\lambda)$ (Коерке, 1984):

$$\rho_{os}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda) = \rho_{wc}(\lambda) + (1 - W) \times \rho_{gl}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda) + (1 - \rho_{wc}(\lambda))\rho_{sw}(\theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda),$$

где θ_s – зенитный угол Солнца, θ_v – зенитный угол спутника, φ – относительный азимутальный угол ($\varphi = \varphi_s - \varphi_v$, где φ_s – азимутальный угол Солнца, φ_v – азимутальный угол спутника), λ – длина волны, $\rho_{wc}(\lambda)$ – коэффициент отражения гребня волны на водной поверхности, $\rho_{gl}(\lambda)$ – коэффициент зеркального отражения солнечного света от поверхности океана, $\rho_{sw}(\lambda)$ – коэффициент отражения морской воды, W – относительная площадь, покрытая гребнем волны.

Коэффициент ρ_{gl} рассчитывается по формуле:

$$\rho_{gl}(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \left(\pi P(Z'_x, Z'_y) R(n, \theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda) \right) / \left(4 \cos(\theta_s) \cos(\theta_v) \cos^4(\beta) \right), \quad (1)$$

где Z'_x и Z'_y – компоненты наклона поверхности (Cox, Munk, 1954), $P(Z'_x, Z'_y)$ – распределение наклона поверхности, выраженное рядом Грама-Шарлье (Cox, Munk, 1954), n – комплексный показатель преломления морской воды, $R(n, \theta_s, \theta_v, \varphi, \lambda)$ – коэффициент отражения Френеля (Born, Wolf, 1975), β – угол наклона поверхности.

Значение ρ_{gl} вычисляется с помощью выражения (1) для каждого пикселя каналов № 2 и № 3,

и это значение вычитается из КСЯ канала. Также стоит отметить, что алгоритм выполняет расчет параметра АОТ над поверхностью воды, исключая области с искаженными значениями на спутниковых изображениях, вызванных солнечными бликами. Для этого рассчитывается угол солнечного блика, и учитываются значения только больше 40° (Zhao, 2017).

Алгоритм для каждого пикселя находит ближайшие значения всех параметров из LUT и счи-

тывает значения смоделированных АОТ и значений КСЯ (которые должны быть зарегистрированы на спутниковом приборе), соответствующих им. После этого производится линейная интерполяция (3) значений КСЯ относительно каждого из параметров:

$$\text{Alb} = \text{Alb}_1 + (\text{Alb}_2 - \text{Alb}_1) \times ((\text{Val}_{curr} - \text{Val}_1) / (\text{Val}_2 - \text{Val}_1)), \quad (2)$$

где Alb – результирующее значение АОТ, Val_1 и Val_2 – граничные значения параметра, Alb_1 и Alb_2 – значения АОТ для Val_1 и Val_2 , Val_{curr} – текущее значение параметра в пикселе.

Для каждого пикселя после вычисления (2) получается массив с 11 значениями КСЯ, каждое из которых соответствует значению АОТ (табл. 1). Этот массив интерполируется относительно массива значений АОТ с шагом 0.001, то есть для каждого значения АОТ от 0 до 5 с шагом 0.001 рассчитываются значения КСЯ каждого канала с помощью (3), при этом в качестве Val используются

$$\text{distance} = \sqrt{(\text{КСЯ}_{curr}^1 - \text{КСЯ}_{LUT}^1)^2 + (\text{КСЯ}_{curr}^2 - \text{КСЯ}_{LUT}^2)^2},$$

где КСЯ_{curr}^1 , КСЯ_{curr}^2 – измеренные значения КСЯ каналов № 2 и № 3 прибора МСУ-МР соответственно, КСЯ_{LUT}^1 , КСЯ_{LUT}^2 – смоделированные значения КСЯ каналов № 2 и № 3 прибора МСУ-МР соответственно.

Кроме наименьшего расстояния между значениями КСЯ двух каналов значение distance представляет собой индекс элемента массива, по которому и выбирается результирующее значение АОТ.

ВАЛИДАЦИЯ

Валидация полученных значений АОТ проводилась по данным сети измерений AERONET, а именно по 14 островным станциям и данным корабельных измерений. Информация отбиралась в период с 2014–2017 гг. с усреднением по времени в пределах 1-часового интервала от времени пролета КА “Метеор-М” № 2, при этом значения АОТ по данным МСУ-МР также были пространственно усреднены в квадрате 25×25 км. Таким образом, для валидации было отобрано 380 наблюдений уровня 2.0. Результаты сравнения показаны на рис. 4.

Для оценки точности восстановления АОТ над морской поверхностью были рассчитаны среднеквадратичная (RMSE), средняя абсолютная (MAE) ошибки и коэффициент корреляции Пирсона (R). RMSE составил 0.137, MAE – 0.09, а R – 80.26%. Результаты валидации показали, что раз-

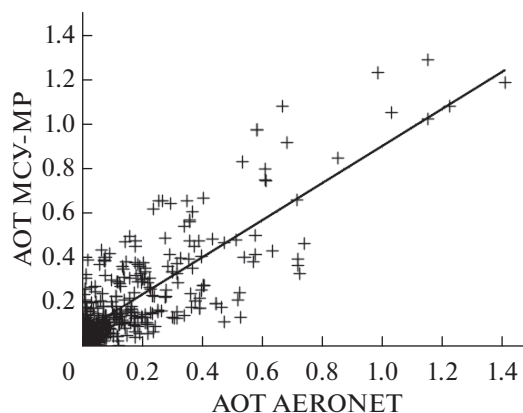


Рис. 4. Результат сравнения восстановленных значений АОТ по данным МСУ-МР и сети AERONET.

значения АОТ из LUT. После этого, с использованием реальных значений КСЯ каждого из каналов, выполняется поиск ближайшего расстояния до результирующего значения АОТ:

работанный метод определения АОТ по данным МСУ-МР не уступает по точности зарубежным алгоритмам по данным приборов VIIRS (Ray, 2014) и AVHRR (Zhao, 2017). Таким образом, по результатам проведенной валидации можно считать, что разработанный алгоритм может быть применен для расчета параметра АОТ на длине волны 550 нм по данным прибора МСУ-МР, поскольку он отвечает предъявляемым требованиям к качеству продукта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был реализован алгоритм расчета параметра АОТ над морской поверхностью по данным прибора МСУ-МР. В качестве исходного был использован метод восстановления АОТ по данным прибора AVHRR, в основе которого лежит оптическая модель аэрозоля, опирающаяся на LUT таблицы, размерность которых была увеличена с четырехмерной до шестимерной. В частности, в LUT таблицу были добавлены общие содержания в столбе атмосферы водяного пара и озона. Анализ результатов проведенной валидации по данным AERONET показал, что разработанный алгоритм не уступает по точности зарубежным аналогам по восстановлению параметра АОТ и может применяться для оперативного расчета параметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев А.И., Шамилова Ю.А., Холодов Е.И. Применение сверточной нейронной сети для детектирования облачности по данным прибора MSU-MR спутника “Метеор-М” № 2 // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 44–53.
<https://doi.org/10.25743/ICT.2019.24.6.007>

Асарин А.Е., Балонишникова Ж.А., Битков Л.М., Булыгина О.Н., Бугров Л.Ю., Виноградова В.В., Гаврилова С.Ю., Ганюшкин Д.А., Гинзбург А.И., Георгиевский М.В., Глазовский А.Ф., Говоркова В.А., Голованов О.Ф., Голод М.П., Гребенец В.И., Гройсман П.Я., Груза Г.В., Губарьков А.А., Данченков М.А., Дацюк Т.А., Дмитриева Е.В., Дроздов Д.С., Елистратов В.В., Жиркевич А.Н., Замолодчиков Д.Г., Иванов В.В., Иванова Т.Б., Ильин Б.М., Инсаров Г.Э., Карклин В.П., Кароль И.Л., Катцов В.М., Кириллов С.А., Киселев А.А., Клепиков А.В., Ковалевский Д.В., Кононова Н.К., Комаров А.С., Коршунова Н.Н., Краев Г.Н., Курганова И.Н., Лебедев С.А., Лейбман М.О., Лурье П.М., Лучин В.А., Максимов А.А., Малеев В.В., Махоткина Е.Л., Мезенцева Л.И., Мелешко В.П., Минин А.А., Мирвис В.М., Муравьев А.Я., Мухортова Л.В., Надеждина Е.Д., Неушкин А.И., Носенко Г.А., Осипов Э.Ю., Осипова О.П., Павлова Т.В., Панов В.Д., Пересыпкин В.И., Платова Т.В., Поздняков Л.А., Пономарев В.И., Попов И.О., Пчелкин А.В., Радионов В.Ф., Разуваев В.Н., Ранькова Э.Я., Решетников А.И., Романенков В.А., Рочева Э.В., Рябченко В.А., Самохина О.Ф., Санина А.Т., Семенов В.А., Семенова И.В., Сирин А.А., Соколов О.В., Спорышев П.В., Степанов А.Л., Страшина А.И., Стрелецкий Д.А., Тимохов Л.А., Титкина С.Н., Трусенкова О.О., Устинова Е.И., Ушакова Р.Н., Хабаров Н.В., Хен Г.В., Хомутов А.В., Хромова Т.Е., Черенкова Е.А., Шахгеданова М.В., Швиденко А.З., Шеремет Н.А., Шерстюков А.Б., Шилин М.Б., Шиятов С.Г., Школьник И.М., Шкорба С.П., Щепашенко Д.Г. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М.: ААНИИ, 2014. 1009 с.

Кучма М.О., Лотарева З.Н., Слесаренко Л.А. Определение маски ледяного покрова дальневосточных морей по данным прибора MSU-MR спутника “Метеор-М” № 2 // Исслед Земли из космоса. 2021. № 2. С. 31–41.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421020032>

Симоненко Е.В., Чудин А.О., Давиденко А.Н. Дифференциальный метод вычисления векторов перемещения облачности // Метеорология и гидрология. 2017. № 3. С. 29–39.

Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Основы теоретической атмосферной оптики: Учебно-методическое пособие. СПб.: Физический ф-т СПбГУ, 2007. 152 с.

Филей А.А., Рублев А.Н., Зайцев А.А. Радиометрическая интеркалибровка коротковолновых каналов многока-

нального спутникового устройства КА “Метеор-М” № 2 по радиометру AVHRR КА “Метор-А” // Современ. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 251–263.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-6-251-263>

Born M., Wolf E. Principles of Optics - fifth edition. Oxford: Pergamon Press, 1975. P. 852.
[https://doi.org/10.1016/0030-3992\(75\)90061-4](https://doi.org/10.1016/0030-3992(75)90061-4)

Buras R., Dowling T., Emde C. New secondary-scattering correction in DISORT with increased efficiency for forward scattering // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2011. V. 112. № 12. P. 2028–2034.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2011.03.019>

Cox C., Munk W. Statistics of the sea surface derived from sun glitter // J. Marine Research. 1954. V. 13. P. 198–227.

Emde C., Buras-Schnell R., Kylling A., Mayer B., Gasteiger J., Hamann U., Kylling J., Richter B., Pause C., Dowling T., Bugliaro L. The libradtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1) // Geoscientific Model Development. 2016. V. 9. № 5. P. 1647–1672.
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-1647-2016>

Koepke P. Effective Reflectance of Oceanic Whitecaps // Applied Optics. 1984. V. 23. № 11. P. 1816–1824.
<https://doi.org/10.1364/ao.23.001816>

Kuchma, M.O., Bloschinskiy, V.D. Algorithm for the Atmospheric Correction of Shortwave Channels of the MSU-MR Radiometer of the Meteor-M No. 2 Satellite // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2020. V. 56. P. 909–915.
<https://doi.org/10.1134/S0001433820090145>

Ray G. Joint Polar Satellite System (JPSS) VIIRS Aerosol Optical Thickness (AOT) and Particle Size Parameter Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) // GSFC JPSS CMO. 2014. Rev. B. P. 64.

Levy R., Remer L., Tanre D., Mattoo S., Kaufman Y. Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol Over Dark Targets from MODIS: Collections 005 and 051: Product ID: MOD 04 / MYD 04 // NASA. 2009. Rev. 2. P. 87.

Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Midgley P.M. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 1535.

Vermote E. F., Tanre D., Deuze J.L., Herman M., Morcrette J.J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1997. V. 35. № 3. P. 675–686.
<https://doi.org/10.1109/36.581987>

Zhao X. NOAA Climate Data Record (CDR) of AVHRR Daily and Monthly Aerosol Optical Thickness (AOT) over Global Oceans, Version 3.0 // NOAA National Centers for Environmental Information. 2017. P. 29.
<https://doi.org/10.7289/V5BZ642P>

Two-Channel Algorithm for Determining the Aerosol Optical Thickness above the Sea Surface Using the MSU-MR Instrument of the Meteor-M No. 2 Satellite

M. O. Kuchma¹, E. I. Kholodov¹, and Y. A. Amel’chenko¹

¹Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology “Planeta”, Khabarovsk, Russia

In this paper, we consider the problem of determining the aerosol optical thickness over the sea surface in relation to the data of a low-resolution multispectral scanning device installed on the Russian satellite “Meteor-M” No. 2 is considered. The presented algorithm is based on the use of an optical model, which is

a six-dimensional look-up table containing information on the reflectance of the satellite device channels for various atmospheric conditions and observation geometry. The results were validated, which showed a correlation of 83% with the reference data of the measurement network AERONET.

Keywords: remote sensing, aerosol, aerosol optical thickness, MSU-MR, look-up table, AERONET

REFERENCES

- Andreev A.I., Shamilova Y.A., Kholodov E.I.* Primenenie svertochnoy neyronnoy seti dlya detektirovaniya oblachnosti po dannym pribora MSU-MR sputnika "Meteor-M" № 2 // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2019. № 7. P. 44–53. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.6.007. (In Russian)
- Asarin A.E., Balonishnikova Z.A., Bitkov L.M., Bulygina O.N., Bugrov L.Y., Vinogradova V.V., Gavrilova S.Y., Ganyushkin D.A., Ginzburg A.I., Georgievskiy M.V., Glazovskiy A.F., Govoarkova V.A., Golovanov O.F., Golod M.P., Grebenets V.I., Groysman P.YA., Gruza G.V., Gubar'kov A.A., Danchenkov M.A., Datsyuk T.A., Dmitrieva E.V., Drozdov D.S., Elistratov V.V., ZHirkevich A.N., Zamolodchikov D.G., Ivanov V.V., Ivanova T.B., Il'in B.M., Inсарov G.E., Karklin V.P., Karol' I.L., Katsov V.M., Kirillov S.A., Kiselev A.A., Klepikov A.V., Kovalevskiy D.V., Kononova N.K., Komarov A.S., Korshunova N.N., Kraev G.N., Kurganova I.N., Lebedev S.A., Leybman M.O., Lur'e P.M., Luchin V.A., Maksimov A.A., Maleev V.V., Makhotkina E.L., Mezentseva L.I., Meleshko V.P., Minin A.A., Mirvis V.M., Murav'ev A.YA., Mukhortova L.V., Nadezhina E.D., Neushkin A.I., Nosenko G.A., Osipov E.YU., Osipova O.P., Pavlova T.V., Panov V.D., Peresyupkin V.I., Platova T.V., Pozdnyakov L.A., Ponomarev V.I., Popov I.O., Pchelkin A.V., Radionov V.F., Razuvaev V.N., Ran'kova E.YA., Reshetnikov A.I., Romanenkov V.A., Rocheva E.V., Ryabchenko V.A., Samokhina O.F., Sanina A.T., Semenov V.A., Semenova I.V., Sirin A.A., Sokolov O.V., Sporyshev P.V., Stepanov A.L., Strashnaya A.I., Streletskiy D.A., Timokhov L.A., Tükina S.N., Trusenkov O.O., Ustinova E.I., Ushakova R.N., Khabarov N.V., Khen G.V., Khomutov A.V., Khromova T.E., CHerenkova E.A., Shakhgedanova M.V., Shvidenko A.Z., Sheremet N.A., Sheryukov A.B., Shilin M.B., Shiyatov S.G., Shkol'nik I.M., Shkorba S.P., Schepaschenko D.G.* Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushey sredy. M.: AANII, 2014. 1009 p. (In Russian)
- Born M., Wolf E.* Principles of Optics - fifth edition. Oxford: Pergamon Press, 1975. P. 852.
DOI: 10.1016/0030-3992(75)90061-4
- Buras R., Dowling T., Emde C.* New secondary-scattering correction in DISORT with increased efficiency for forward scattering // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2011. V. 112. № 12. P. 2028–2034.
DOI: 10.1016/j.jqsrt.2011.03.019
- Cox C., Munk W.* Statistics of the sea surface derived from sun glitter // *J. Marine Research*. 1954. V. 13. P. 198–227.
- Emde C., Buras-Schnell R., Kylling A., Mayer B., Gasteiger J., Hamann U., Kylling J., Richter B., Pause C., Dowling T., Bugliaro L.* The libradtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1) // *Geoscientific Model Development*. 2016. V. 9 № 5. P. 1647–1672.
DOI: 10.5194/gmd-9-1647-2016
- Filey A.A., Rublev A.N., Zaytsev A.A.* Radiometricheskaya interkalibrovka korotkovolnovnykh kanalov mnogokanal'nogo sputnikovogo ustroystva KA "Meteor-M" № 2 po radiometru AVHRR KA "Metop-A" // *Sovrem. probl. dist. zondir. Zemli iz kosmosa*. 2016. T. 13. № 6. P. 251–263. (In Russian)
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-251-263
- Koepke P.* Effective Reflectance of Oceanic Whitecaps // *Applied Optics*. 1984. V. 23. № 11. P. 1816–1824.
DOI: 10.1364/ao.23.001816
- Kuchma, M.O., Bloschinskiy, V.D.* Algorithm for the Atmospheric Correction of Shortwave Channels of the MSU-MR Radiometer of the Meteor-M No. 2 Satellite // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2020. V. 56. P. 909–915.
DOI: 10.1134/S0001433820090145
- Kuchma M.O., Lotareva Z.N., Slesarenko L.A.* Opredelenie maski ledyanogo pokrova dal'nevostochnykh morej po dannym pribora MSU-MR sputnika "Meteor-M" № 2 // *Issled Zemli iz kosmosa*. 2021. № 2. P. 31–41. (In Russian)
DOI: 10.31857/S0205961421020032
- Levy R., Remer L., Tanre D., Mattoo S., Kaufman Y.* Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol Over Dark Targets from MODIS: Collections 005 and 051: Product ID: MOD 04 / MYD 04 // NASA. 2009. Rev. 2. P. 87.
- Ray G.* Joint Polar Satellite System (JPSS) VIIRS Aerosol Optical Thickness (AOT) and Particle Size Parameter Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) // GSFC JPSS CMO. 2014. Rev. B. P. 64.
- Simonenko E.V., Chudin A.O., Davidenko A.N.* Differentsial'nyy metod vychisleniya vektorov peremescheniya oblachnosti // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2017. № 3. P. 29–39. (In Russian)
- Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M.* Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Midgley P.M. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 1535.
- Timofeev Y.M., Vasil'ev A.V.* Osnovy teoreticheskoy atmosferynoy optiki: Uchebno-metodicheskoe posobie. SPb.: Fizicheskiy f-t SPbGU, 2007. 152 p. (In Russian)
- Vermote E. F., Tanre D., Deuze J.L., Herman M., Morcrette J.J.* (1997a). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1997. V. 35. № 3. P. 675–686.
DOI: 10.1109/36.581987
- Zhao X.* NOAA Climate Data Record (CDR) of AVHRR Daily and Monthly Aerosol Optical Thickness (AOT) over Global Oceans, Version 3.0 // NOAA National Centers for Environmental Information. 2017. P. 29.
DOI: 10.7289/V5BZ642P

К 85-ЛЕТИЮ АНАТОЛИЯ АЛЕКСЕЕВИЧА БУЗНИКОВА

DOI: 10.31857/S0205961422020099



11 февраля 2022 г. исполнилось 85 лет одному из старейших членов редколлегии журнала “Исследование Земли из космоса”, заслуженному деятелю науки Российской Федерации, заслуженному профессору Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ”, руководителю лаборатории космического дистанционного зондирования природной среды, профессору кафедры фотоники, доктору технических наук Анатолию Алексеевичу Бузникову.

За 65 лет своей научно-педагогической деятельности он внес значительный вклад в развитие исследований Земли из космоса, разработку методов и аппаратуры для дистанционного зондирования природной среды и природных ресурсов нашей планеты, подготовку научных кадров и в предполетное обучение космонавтов проведению геофизических экспериментов.

А.А. Бузников широко известен в нашей стране и за рубежом как специалист в области создания технических средств и разработки методов дистанционного зондирования атмосферы, Мирового океана и природных ресурсов Земли с аэрокосмических носителей, глобального и регионального экологического мониторинга.

Свою научную деятельность А.А. Бузников начал, будучи студентом Ленинградского электро-

технического института (ЛЭТИ). В 1960 г. он с отличием окончил ЛЭТИ и продолжил работу в нем в качестве научного сотрудника, аспиранта, преподавателя. В этот период он разработал новые методы и приборы для низкотемпературной пирометрии удаленных объектов, организовал и провел ряд экспедиционных работ по изучению влияния атмосферы на прохождение ИК-излучения от природных объектов. В 1964 г. участвовал в экспедиции на Камчатку, где совместно с учеными Института вулканологии СО АН СССР впервые применил ИК-радиометры для дистанционного изучения термического режима действующих вулканов.

В 1966 г. после защиты кандидатской диссертации А.А. Бузников был приглашен ректором ЛГУ академиком К.Я. Кондратьевым на работу в университет на кафедру физики атмосферы, где он проработал с 1967 г. по 1979 г. На кафедре А.А. Бузников организовал лабораторию высотной актинометрии и спутниковых измерений, на базе которой в 1975 г. совместным приказом Минводхоза СССР и Минвуза РСФСР было организовано Особое конструкторское бюро аэрокосмической аппаратуры “Интеграл” с опытным производством, на котором А.А. Бузников работал главным инженером, первым заместителем директора – главным конструктором ОКБ.

На кафедре физики атмосферы ЛГУ, возглавляемой академиком К.Я. Кондратьевым, А.А. Бузниковым были разработаны и экспериментально проверены основные методы космической спектрофотометрии природной среды. Под его руководством и при непосредственном участии был разработан и установлен на пилотируемых космических кораблях “Союз” и орбитальных станциях “Салют” комплекс малогабаритных спектральных приборов, которые стали первыми в мире спектральными приборами для изучения Земли из космоса. Успешное применение этих приборов позволило впервые в мировой практике получить спектры сумеречной и дневной атмосферы, а также спектры различных типов природных образований на поверхности Земли, что расширило возможности космических экспериментов и позволило в значительной степени оптимизировать спектральные каналы многоспектральных сканирующих устройств, установленных на ИСЗ “Метеор” и “Метеор-Природа”.

Под руководством А.А. Бузникова был разработан и изготовлен комплекс солнечных спектрометров КСС-2, который успешно прошел летно-

конструкторские испытания на орбитальной станции “Салют-4”. Это был первый в мировой практике негерметизированный спектрометр высокого разрешения, работавший за пределами корпуса орбитальной станции в условиях высокого вакуума. С помощью КСС-2 впервые была реализована схема затменного зондирования атмосферы Земли и получены достоверные данные о вертикальном распределении водяного пара в стратосфере и мезосфере на высотах от 30 до 60 км. Успех первых космических экспериментов по спектральным исследованиям атмосферы и природных образований позволил создать новое научное направление – космическую спектрофотометрию природной среды.

В октябре 1969 и июне 1970 гг. во время полетов пилотируемых кораблей “Союз-7” и “Союз-9” под руководством А.А. Бузникова впервые были проведены синхронные подспутниковые эксперименты с участием самолетов-лабораторий и наземных научно-исследовательских групп, состоящих из сотрудников организаций разного профиля. В настоящее время подспутниковые эксперименты стали основным методом глобальных и региональных экологических космических исследований. Однако, выполненные под руководством А.А. Бузникова подспутниковые эксперименты остаются до настоящего времени уникальными по объему и значению решенных задач в интересах дистанционного зондирования природной среды.

При подготовке и реализации программ космических исследований А.А. Бузников большое внимание уделял подготовке космонавтов, непосредственно осуществлявших наблюдения на орбите. Разработанные методы и оригинальные приборы позволили А.А. Бузникову совместно с другими учеными и космонавтами сделать открытие вертикально-лучевой структуры (горизонтальной неоднородности) дневного излучения верхней атмосферы Земли в переходной области от ночного эмиссионного слоя до зоны цветного сумеречного ореола, зарегистрированное в Государственном реестре СССР за № 106. Успех этих экспериментов во многом определил приоритетный вклад советских и российских космических исследований в изучении атмосферы, океана и природных ресурсов Земли.

В 1985 г. Анатолий Алексеевич защитил докторскую диссертацию на тему “Космическая спектрофотометрия природной среды с пилотируемых орбитальных станций”. В 1987 г. в соответствии с Постановлением ГКНТ СССР и совместным приказом Главкосмоса СССР и Минвуза РСФСР в ЛЭТИ была организована отраслевая научно-исследовательская лаборатория дистанционного зондирования и оптимизации аэрокосмических методов природных ресурсов Земли (ОНИЛ КДЗ), которая стала одним из ведущих центров нашей страны по разработке методов и

аппаратуры для глобального и регионального космического экологического мониторинга. Внедрение результатов этих исследований осуществлено во время полетов космических комплексов “Салют”, “Алмаз” и “Мир”.

А.А. Бузников ведет большую научно-организационную работу. Он является членом редколлегий журналов “Исследование Земли из космоса” РАН, Известия Высших учебных заведений России “Радиоэлектроника”, действительным членом Санкт-Петербургской инженерной академии (1990) и Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (1991), членом-корреспондентом Петровской академии наук (2000).

А.А. Бузников всегда успешно сочетал научную работу с педагогической деятельностью. Его учениками защищены 15 кандидатских и две докторские диссертации. В настоящее время он читает разработанные им курсы лекций “Дистанционное зондирование природной среды с аэрокосмических носителей”, “Квантовые и оптико-электронные системы” и “Информационная оптика”.

А.А. Бузниковым опубликовано более 550 научных работ. В одной из монографий “Global Change and Remote Sensing”, написанной совместно с академиком К.Я. Кондратьевым и профессором О.М. Покровским, показан приоритет советско-российских космических исследований.

А.А. Бузников награжден орденом “Знак Почета” (1976), медалью академика С.П. Королева (1974), медалью (1989) и дипломом (1975) имени летчика-космонавта СССР Ю.А. Гагарина, медалью “Ветеран труда” (1990), медалью имени академика С.Э. Фриша (2017), Золотой (1972), Серебряной (1973) и Бронзовой (1986) медалями ВДНХ СССР, медалями “За вклад в информатизацию” (2010), “За вклад в развитие информационного общества” (2015), почетными медалями “В честь полного освобождения Ленинграда от фашистской блокады” (1995, 1999, 2004, 2009, 2014), медалью “В память 300-летия Санкт-Петербурга” (2003), знаком “Житель блокадного Ленинграда”.

В 2000 г. Указом Президента Российской Федерации А.А. Бузникову присвоено почетное звание “Заслуженный деятель науки Российской Федерации”. В 2015 г. ученый совет Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета присвоил А.А. Бузникову почетное звание “Заслуженный профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ”.

Редколлегия журнала “Исследование Земли из космоса” РАН поздравляет Анатолия Алексеевича Бузникова с 85-летием и желает ему здоровья, долгих лет жизни и новых творческих успехов.