СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОКЕАНА. ЧАСТЬ 1

А.Г. Костяной ^{1),2)}

¹⁾ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36; *Kostianoy@gmail.com*

²⁾ Московский университет им. С.Ю. Витте, Россия, 115432, г. Москва, 2-й Кожуховский проезд, 12, строение 1

Резюме. Цель работы обзор современных возможностей дистанционного зондирования океанов и морей из космоса для мониторинга параметров кли-матической системы Земли. В данной статье (часть 1) приводятся сведения об основных климатических переменных, мониторинг которых ведется. соот-ветствующих климатических программах. И Приводится информация 0 спутни-ковом мониторинге температуры океана, солености поверхности океана и уровня океана. поверхности Описываются приборы И спутники, которые исполь-зуются для исследования этих климатических переменных. Приводятся неко-торые результаты мониторинга на примере Балтийского, Черного и Каспийского морей.

Ключевые слова. Климатическая система, спутниковый мониторинг, дистанционное зондирование, океаны и моря, климатические переменные, приборы и спутники, Мировой океан, Балтийское море, Черное море, Каспийское море.

SATELLITE MONITORING OF THE OCEAN CLIMATE PARAMETERS. PART 1

A.G. Kostianov^{1),2)}

 P.P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovsky Pr., 117997, Moscow, Russia; *Kostianoy@gmail.com* ²⁾ S.Yu. Witte Moscow University, 12, 2-nd Kozhukhovsky Pr., Build. 1, 115432, Moscow, Russia

Summary. A purpose of the work is to overview the current capabilities of remote sensing of oceans and seas from the space for monitoring the Earth's climate system parameters. In this paper (Part 1), an information on major climate variables being monitored and respective climate programs is presented. The information on satellite monitoring of sea surface temperature, sea surface salinity and ocean level is given. Satellites and sensors used for the study of these climate variables are described. Some monitoring results for the Baltic, Black and Caspian seas are shown.

Keywords. The climate system, satellite monitoring, remote sensing, oceans and seas, climate variables, instruments and satellites, the World Ocean, the Baltic Sea, the Black Sea, the Caspian Sea.

введение

Исследования регионального и глобального изменения климата основываются на многолетних рядах наблюдений на метеорологических станциях и постах. Метеорологическая сеть является основой информационно-измерительной системы Росгидромета (Костяной и др., 2012). Первые инструментальные метеорологические наблюдения в России были начаты в Петербурге в 1725 году академиком Ф.Х. Майером. Например, температура воздуха в Москве известна с 1775 года. В 1834 году в Петербурге под руководством академика А.Я. Купфера была создана Нормальная магнитно-метеорологическая обсерватория, на базе которой в 1849 году была учреждена Главная физическая обсерватория (ГФО). В функции ГФО входило руководство всеми метеорологическими и магнитными наблюдениями России по единым методикам и программам, разработка приборов и обеспечение ими создаваемой сети наблюдений, обобщение и издание материалов наблюдений. Важнейшим направлением деятельности ГФО стало создание метеорологических обсерваторий для отдельных краев и подчинение геофизических наблюдений единому государственному центру. К концу XIX века российская метеорологическая сеть насчитывала 839 станций, 1020 дождемерных и 1830 снегомерных постов, кроме того, функционировали пункты метеорологических наблюдений Русского Географического общества, университетов, других организаций и ведомств. В 1899 году к 50-летию ГФО был издан «Климатический Атлас Российской империи» (География России, 2017).

Если в 1914 году метеорологическая сеть России насчитывала уже 1416 станций и 1480 постов, то во время Гражданской войны она сократилась до 200 станций и 125 постов (1920 г.). В 1924 году ГФО переименовали в Главную геофизическую обсерваторию (ГГО), которой в 1949 году по случаю 100летия со дня основания обсерватории было присвоено имя выдающегося российского климатолога А.И. Воейкова. К концу 1970-х годов число станций и постов на территории бывшего СССР достигло своего максимума и превысило 6000, из которых 4665 относились к системе Гидрометслужбы, остальные — к другим ведомствам (География России, 2017).

Сегодня в мире существует 97 851 метеостанция, имеющая синоптический индекс Всемирной метеорологической организации (ВМО) (Метеоцентр, 2017). Более точные прогнозы погоды и исследования регионального и глобального климата требуют расширения сети гидрометеорологических наблюдений, особенно в труднодоступных или малонаселенных районах Земного шара. К таким районам, в первую очередь, относится Мировой океан, который занимает около 70 % земной поверхности или примерно 361 млн км². Если примерно на 149 млн км² суши приходится около 98 тыс. метеостанций, которые находятся в своем большинстве на суше, то в среднем 1 метеостанция приходится на 1500 км² (для сравнения площадь Москвы в пределах МКАД составляла 1070 км²). Очевидно, что гигантская акватория Мирового океана (за исключением данных с островных метеостанций и маяков, дрейфу-

ющих и заякоренных буев, НИС и попутных судов) остается фактически вне сети регулярных наблюдений, сколько-нибудь сравнимой с сетью метеорологических наблюдений на суше.

Задача по восполнению пробелов в данных наблюдений на акватории Мирового океана решается тремя основными способами:

- (1) Развитием региональных И глобальных, национальных И международных комплексных, скоординированных систем наблюдений за океаном, которые включают экспедиционные исследования на НИС; использование попутных наблюдений с торговых и пассажирских судов (например, Ship-of-Opportunity Programme WMO); запуск нескольких тысяч дрейфующих буев, включая профилографы Арго, число которых на 31 января 2017 г. в Мировом океане составляло 3969; расширением глобальной сети наблюдений за уровнем моря (GLOSS, http://www.gloss-sealevel.org/) с использованием как традиционных мареографов, так и акустических, других систем наблюдений лазерных И за уровнем моря, телеметрическими системами оборудованных для оперативной передачи данных наблюдений, что особенно важно для раннего предупреждения о цунами.
- (2) Развитием методов численного моделирования с усвоением данных наблюдений для восстановления полей гидрометеорологических параметров в узлах регулярной сетки с определенным временным шагом на всей поверхности Земного шара, включая акваторию Мирового океана. Результатом этих работ являются различные реанализы данных (число которых уже более 60), например, «NCEP/ Reanalysis», который является совместным NCAR проектом Национальных Центров Предсказания Окружающей Среды (National Centers for Environmental Prediction - NCEP) и Национального Центра Изучения Атмосферы (National Center for Atmospheric Research -NCAR) (Kalnay et al., 1996). Целью таких проектов является создание гидрометеорологических баз исторических данные (включая текущее состояние атмосферы и океана) благодаря сбору и анализу сухопутных, судовых, радиоветровых, шаропилотных, самолётных, спутниковых и других данных. Реанализы широко используются для изучения погоды и климата Земли.
- (3) Развитием методов дистанционного зондирования океанов и морей из космоса. Спутниковая эра началась всего 60 лет назад с запуском в СССР первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 года. 1 апреля 1960 года США запускает первый метеорологический спутник TIROS-1 с черно-белой телевизионной камерой, предназначенной для отслеживания движения облаков и получения первых нечетких изображений температуры поверхности океана. В СССР первая микроволновая автоматическая радиометрическая система лля наблюдения поверхностью континентов океана была за И использована в 1968 году на борту спутника «Космос-243», что

позволило получить первые спутниковые карты температуры поверхности океана. В последующие годы произошел бурный рост космических технологий, позволяющий сегодня получать большое количество разнообразной океанографической, метеорологической, геофизической, биологической и геологической информации (Гарбук, Гершензон, 1997; Rees, 2001; Fu, Cazenave, 2001; Askne, 2003; Barale et al., 2010; Vignudelli et al., 2011; Лаврова и др., 2011, 2016; Kostianoy et al., 2017). В настоящее время спутниковая информация о состоянии океана, атмосферы и суши широко используется для исследования регионального и глобального климата, в том числе, благодаря ассимиляции спутниковых данных в глобальные реанализы (IPCC, 2013; Rhein et al., 2013; Катцов, Семенов, 2014).

В данной статье (Часть 1) мы приведем краткий обзор возможностей дистанционного зондирования океанов и морей из космоса для мониторинга следующих параметров климатической системы Земли, относящихся к океану: температура поверхности океана, соленость поверхности океана и уровень океана. В Части 2 статьи будут рассмотрены следующие параметры: характеристики волнения, концентрация морского льда, поверхностные течения, цвет океана и фитопланктон. В следующих номерах журнала будут рассмотрены возможности ДЗЗ для мониторинга основных климатических параметров суши и атмосферы.

Основные климатические программы и параметры

В 1980 году началось осуществление Всемирной климатической программы (ВКП, WCP) под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО, WMO), Межправительственной океанографической комиссии (МОК, IOC) ЮНЕСКО, Международного научного совета (МНС, ICSU) и Программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП, UNEP). Важнейшей составляющей этой программы является Всемирная программа исследования климата (ВПИК, WCRP), результаты которой используются Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК, IPCC) для оценки изменений климата и их последствий на природную среду и деятельность человека для последующего определения действий государств по реализации Рамочной Конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН, UNFCCC) (Толкачев, 2013).

С 1991 года МОК ЮНЕСКО совместно с ВМО, ЮНЕП и МНС осуществляет развитие Глобальной системы наблюдений за океаном (ГСНО, GOOS), которая обеспечивает океанический компонент Глобальной системы наблюдений за климатом (ГСНК, GCOS) и морской прибрежный компонент Глобальной системы наблюдений за сушей (ГСНС, GTOS). Развитие ГСНО осуществляется также в тесном сотрудничестве с Глобальной системой наблюдений за Землей (ГЕОСС, GEOSS). ГСНО – глобальная, унифицированная, международная система для систематических наблюдений, сбора и распространения океанографических данных наблюдений, подготовки анализов и прогнозов и другой продукции, в целях обеспечения правительств, отраслей экономики, науки и общественности информацией, необходимой для морской деятельности, включая влияние океана на климат. Важную роль в осуществлении ГСНО играет Совместная МОК-ВМО Техническая комиссия по океанографии и морской метеорологии (СКОММ, ЈСОММ), созданная в 1999 году для координации океанографических и морских метеорологических наблюдений, оперативного обмена данными наблюдений и подготовки океанографических морских метеорологических анализов прогнозов И И (www.jcomm.info). Информация о развитии и планировании ГСНО размещается на сайте ГСНО - www.ioc-goos.org. Подробная информация о состоянии существующих систем наблюдений в океане, координируемых ЈСОММ, размещается Международным центром JCOMM на сайте www.jcommops.org (Толкачев, 2013).

В рамках программы Глобальной системы наблюдений за климатом (GCOS) был разработан перечень из 50 основных климатических переменных (ОКП), необходимых для систематических наблюдений с целью оценки климатических изменений на Земле (http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/ index.php?name=EssentialClimateVariables). К океану относятся следующие ОКП, которые разделены на 2 группы:

- (1) <u>Поверхность океана, включая верхний перемешанный слой до</u> <u>глубины 15 м</u>: температура поверхности океана (ТПО, или моря – ТПМ), соленость на поверхности океана, уровень океана, состояние поверхности океана, концентрация морского льда, течения на поверхности океана, цвет океана, парциальное давление двуокиси углерода, кислотность океана, фитопланктон.
- (2) <u>Толща океана</u>: температура, соленость, течения, питательные вещества, парциальное давление двуокиси углерода, кислотность океана, кислород и трассеры.

Именно эти характеристики океана и будут рассмотрены в данной статье с точки зрения возможности их измерения и мониторинга из космоса. Следует отметить, что в западной литературе, кроме термина «Essential Climate Variables» (ECV) («Основные Климатические Переменные» (ОКП)), также встречаются следующие термины:

- (1) Key climatological observables Основные климатологические наблюдаемые параметры (Feistel et al., 2016);
- (2) Essential Ocean Variables (EOVs) Основные океанические переменные (ООП);
- (3) Ocean Color ECVs ОКП, относящиеся к цвету океана (https:// ec.europa.eu/jrc/en/research-topic/ocean-colour-essential-climatevariables);
- (4) Ecosystem EOVs экосистемные ООП (Constable A.J. et al., 2016);
- (5) Biological EOVs биологические ООП;
- (6) Biogeochemical EOVs биогеохимические ООП.

В российской литературе также используется термин «основные климатические параметры», например, в Строительных нормах и правилах Российской Федерации «Строительная климатология» СНиП 23-01-99* РФ, в разработке которых принимала участие ГГО Росгидромета (Строительная климатология, 2003).

Прямые и косвенные измерения характеристик океана из космоса

В настоящее время (начало февраля 2017 г.) на разных околоземных орбитах находится 161 работающий искусственный спутник Земли (ИСЗ), оснащенный радиолокаторами, скаттерометрами, радиометрами, спектрорадиометрами, альтиметрами и оптической техникой, работающими в разных частотных диапазонах. Все они выведены на орбиту специально для получения разносторонней метеорологической и геофизической информации, необходимой для оценки состояния окружающей среды, мониторинга погоды и климата, а также для природно-ресурсных исследований. Эти спутники принадлежат нескольким десяткам национальных и международных космических агентств, среди которых наиболее важная роль в исследовании Земли принадлежит Национальному управлению по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (НАСА США, NASA) и Европейскому космическому агентству (ЕКА, ESA).

Методы дистанционного зондирования Мирового океана подразделяют на три типа: пассивные, полуактивные и активные. Пассивные методы основаны на регистрации теплового излучения, видимого излучения и естественного гаммаизлучения с поверхности моря. Полуактивные методы основаны на облучении морской поверхности естественными и искусственными источниками электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне и анализе спектрального состава принятого сигнала с поверхности акватории. При использовании активных методов исследуемая водная поверхность облучается источниками излучения заданного спектрального состава с регистрацией или отраженного излучения, или флуоресценции, или комбинационного рассеяния. Активные и пассивные сенсоры способны детектировать видимую, инфракрасную и микроволновую области электромагнитного спектра, которые используются для прямого измерения четырех основных параметров океанов и морей: цвета, температуры, высоты и шероховатости морской поверхности. Измерения этих параметров позволяют извлечь следующую информацию об океане:

- (1) микроволновые сенсоры (альтиметры, скаттерометры, радары с синтезированной апертурой) используются для определения высоты морской поверхности, уровня океанов и морей, шероховатости морской поверхности, высоты волн, скорости приводного ветра, наблюдения за ледяным покровом, нефтяным загрязнением, динамикой вод и пр. Микроволновая радиометрия позволяет определять солёность поверхностных вод, однако, пока еще с точностью, не достаточной для решения большинства задач в океанографии;
- (2) цветовые сканеры определяют спектральные свойства радиации, восходящей с водной поверхности, которая несет информацию о различных оптических характеристиках поверхностного слоя океана – прозрачности вод, концентрации взвешенного вещества, содержании

хлорофилла, цветении вод и пр. Показатель поглощения желтого вещества используется как характеристика содержания окрашенной органики в морской воде. Это одна из основных характеристик качества воды в прибрежной зоне. Показатель рассеяния назад взвешенными частицами достаточно надежно рассчитывается по данным спутниковых сканеров цвета. Он характеризует содержание взвеси в воде, определяет альбедо океана и является удобным параметром мониторинга. Концентрация хлорофилла – единственная характеристика морских экосистем, изменчивость которой, благодаря спутниковым наблюдениям, может быть изучена в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Это важнейший параметр для характеристики биомассы фитопланктона и расчета первичной продукции океанов и морей. Оптический диапазон позволяет также наблюдать скопления и кромку льда, айсберги, и при определенных условиях – нефтяные загрязнения;

(3) инфракрасные и микроволновые сенсоры используются для измерения температуры поверхности океана/моря. В отличие от инфракрасных радиометров и спектрорадиометров, пассивные микроволновые сенсоры могут измерять поле ТПО в условиях сплошной облачности, правда с меньшей точностью и пространственным разрешением. Инфракрасные радиометры позволяют также наблюдать скопления и кромку льда.

Спутниковые сенсоры, в основном, способны получать разнообразную информацию об океане фактически только с ее поверхности, при этом под «поверхностью океана», в большинстве случаев, понимается верхний слой толщиной порядка 1 – 10 м. Эта особенность спутниковых методов, вероятно, стала одной из причин разделения ОКП на 2 группы – (1) поверхность океана, включая верхний перемешанный слой до глубины 15 м, и (2) толщу океана. Таким образом, переменные, входящие во вторую группу ОКП (температура, соленость, течения, питательные вещества, парциальное давление двуокиси углерода, кислотность океана, кислород и трассеры), принципиально не могут быть измерены напрямую из-за ограничения спутниковых методов. Кроме того, содержание питательных веществ (в виде соединений азота, фосфора, калия, кальция, серы и магния), концентрация двуокиси углерода, кислотность океана, содержание кислорода и трассеры (вероятно, хлорфторуглероды) дистанционным образом в воде не измеряются. Следует отметить, что ряд явлений и процессов в толще океана могут проявляться на ее поверхности, например, фронты, течения, внутренние волны, апвеллинги, внутритермоклинные вихри и др., и благодаря этому могут быть также (при определенных условиях) детектироваться из космоса.

Таким образом, спутниковые методы могут быть использованы для мониторинга только 8 следующих параметров, входящих в первую группу ОКП: температура поверхности океана, соленость на поверхности океана, уровень океана, состояние поверхности океана (волнение), концентрация морского льда, течения на поверхности океана, цвет океана и фитопланктон. Более подробно они будут рассмотрены в следующем разделе.

Спутниковый мониторинг океанических ОКП

(1) Температура поверхности океана

ТПО – одна из важнейших характеристик океана, которая измеряется уже более 45 лет из космоса с помощью различных радиометров, СВЧ-радиометров и спектрорадиометров, установленных на десятках спутниках. На рис. 1 представлена одна из первых карт Гольфстрима в поле ТПО, полученная 2 июня 1966 г. с американского спутника Nimbus-II. ТПО рассчитывается по данным о радиояркостной температуре, измеряемой инфракрасными и сверх-высокочастотными радиометрами (включая радиометры, сканирующие вдоль подспутникового следа), и по данным сканеров видимого диапазона, которые имеют дополнительный канал в ИК-диапазоне. Мониторинг ТПО осуществляется с помощью различных версий радиометров AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer — усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения), установленных на нескольких спутниках серии NOAA-KLM, имеющих пять спектральных каналов, обладающих пространственным разрешением 1.1 км и разрешением по температуре 0.1 °C.



Рисунок 1. Гольфстрим в поле ТПО (2 июня 1966 г., NimbusII) Черный цвет – воды с температурой более 300 °К, темно-серый – 295 - 300 °К, белый – менее 295 °К, светло-серый – облачность (http://www.photolib.noaa.gov/bigs/spac0006.jpg)

Радиометры используются для широкого диапазона задач по мониторингу состояния окружающей среды, включая: анализ и прогноз погоды; изучение поля температуры поверхности океанов и морей, а также температуры и влажности атмосферы; мониторинг динамики вод океана, извержений вулканов, лесных пожаров, пылевых бурь, интенсивности вегетации и др. Дважды в день каждый спутник покрывает любую точку на поверхности Земного шара. Для мониторинга ТПО также используются спектрорадиометры MODIS, установленные на спутниках Тегга и Aqua; оптический и инфракрасный радиометр VIIRS, установленный на спутнике Suomi NPP; AVHRR/3, установленный на спутнике MetOp-2 Европейского космического агентства и многие другие. Они позволяют получать карты ТПО всего Мирового океана каждые 1-2 дня. Основной проблемой при восстановлении полей ТПО на основе спутниковых данных является облачность, поэтому для районов, практически постоянно закрытых облачностью, используются СВЧ-радиометры, которые обладают существенно худшим разрешением по пространству - 25 км и температуре – 0.8 °С (Лаврова и др., 2011; Костяной и др., 2012).

Для исследования мезомасштабной динамики вод вполне хватает разрешения радиометров порядка 1 км (рис. 2), однако новые сенсоры с инфракрасными каналами, установленными на спутниках серии Landsat (TM на Landsat-5, ETM+ на Landsat-7 и TIRS на Landsat-8) (Лаврова и др., 2011, 2016), имеют разрешение 60-100 м (для разрешения обычно дается наилучшее значение в надире, к которому при обработке приводятся карты и размер пикселей) и дают исключительные по своей детальности изображения ТПО, сравнимые только с оптическими изображениями высокого пространственного разрешения (рис. 3). Недостаток этих данных заключается в том, что эти приборы осуществляют съемку одного и того же района один раз в 16 дней, что с учетом вероятности частичного или полного облачного покрова исследуемого района делает их непригодными для климатических задач. Кроме того, 100-метровое пространственное разрешение, вероятно, избыточно для климатических исследований. На рис. 2 представлено поле ТПО Балтийского моря, полученное спектрорадиометром MODIS Aqua с разрешением 1 км, а на рис. 3 – поле ТПО восточной части Гданьского залива, полученное сенсором TIRS Landsat-8 с разрешением 100 м.

Рис. 2 был подобран таким образом, чтобы показать несколько характерных эффектов, свойственных полям ТПО. По локальным аномалиям ТПО хорошо видно положение циклонических и антициклонических вихрей, струй, а также зоны прибрежного апвеллинга с относительно холодной водой (темно-синий цвет) вдоль побережья Германии, Польши, России, Литвы и Латвии. Красное пятно в Гданьском заливе показывает положение относительно теплых вод, образовавшихся в результате сильного солнечного прогрева верхнего слоя моря практически в полдень, в безоблачных и безветренных условиях. Такой прогрев обычно сильно маскирует все динамические структуры в море и затрудняет интерпретацию спутниковых данных, поэтому очень часто используются тепловые снимки, полученные в ночное время. Белые пятна мористее Литвы и Латвии представляют собой облачность, которая является препятствием для получения информации о ТПО.



Рисунок 2. Поле ТПО Балтийского моря (7 июня 2016 г., 12:05 GMT, MODIS-Aqua)



Рисунок 3. Поле ТПО восточной части Гданьского залива (7 июля 2014 г., 09:43 GMT, TIRS Landsat-8)

Для решения климатических задач используются композитные карты ТПО, в которых убраны эффекты облачности и локального солнечного прогрева за счет осреднения значений ТПО и с помощью численных методов, например, за неделю, месяц, сезон или год для определенного моря, района или всего Мирового океана в целом. На рис. 4 представлена композитная карта Земного шара в истинных цветах на 1 февраля 2017 г., которая показывает, насколько различные акватории Мирового океана покрыты облачностью. На рис. 5 представлена уже композитная карта ТПО также на 1 февраля 2017 г., полученная по совокупности данных радиометров с различных спутников, на которой облачность уже отсутствует (удалена путем пространственно-временной интерполяции данных и использованием моделирования).



Рисунок 4. Композитная карта Земного шара (88.5° с.ш., 85° ю.ш.) в истинных цветах (1 февраля 2017 г., MODIS-Terra) (https://worldview.earthdata.nasa.gov)



Рисунок 5. Композитная карта ТПО Мирового океана (80° с.ш., 80° ю.ш.) 1 февраля 2017 г. Диапазон ТПО от 0 до 32 °С. (https://worldview.earthdata.nasa.gov)

А.Г. Костяной

Такие карты, а точнее спутниковые базы данных используются для исследования сезонной и межгодовой изменчивости ТПО отдельных морей (Костяной и др., 2014а, б) или всего Мирового океана в целом. На рис. 6 и 7 представлена сезонная и межгодовая изменчивость ТПМ Черного моря за 1982-2009 гг., полученная по результатам анализа спутниковых данных (Гинзбург и др., 2011; Костяной и др., 2012).



Рисунок 6. Изменчивость среднемесячных значений ТПМ (°С) Черного моря с 1982 по 2000 год по спутниковым данным Линейный тренд равен 0.06 °С/год (Костяной и др., 2012)



Линейный тренд равен 0.06 °С/год. (Гинзбург и др., 2011)

(2) Соленость поверхности океана

2 ноября 2009 г. на орбиту был запущен спутник SMOS Европейского космического агентства, предназначенный, в частности, для измерения солености на поверхности океана. SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinityвлажность почв и соленость океана) является очередным космическим аппаратом из серии спутников Earth Explorer, задача которых – изучение важнейших параметров Земли в рамках проводимой Европейским космическим агентством (EKA) программы «Живая планета» (Living Planet). SMOS – первый спутник, предназначенный для глобальных измерений влажности почв на суше и солености Мирового океана. Космический аппарат SMOS был разработан и изготовлен консорциумом научно-исследовательских учреждений и производственных предприятий Европы.

Программа SMOS использует на одноименном спутнике интерферометр-радиометр MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis), позволяющий проводить в глобальном масштабе измерения влажности почв и растительности суши с пространственным разрешением 60 км и солености морских вод с разрешением 200 км. Радиометр дает изображения, соответствующие интенсивности собственного излучения поверхности в L-диапазоне (длина волны 21 см). Вычисление значений солености осуществляется на основе измеренных значений яркостной температуры в L-диапазоне при разных углах наклона и поляризации приемной антенны. Параллельно с разработкой аппаратуры спутника, выполняющей первичную оценку солености «в точке», активно разрабатывались методы пространственно-временного осреднения результатов таких измерений, позволяющие уменьшать влияние ошибок измерений и статистического шума. После ряда подготовительных процедур 21 мая 2010 г. спутник SMOS приступил к оперативной работе (Костяной и др., 2012). Данные со спутника SMOS впервые позволили построить относительно высокоточную (пространственное разрешение 35 км, точность измерения солености 0.3 ‰), регулярно обновляемую (каждые 3 дня) глобальную карту солености Мирового океана (Tzortzi et al., 2016), что расширяет наши знания закономерностях океанических течений. 0 взаимодействии океана и атмосферы, водообмене и их воздействии на климатическую систему (рис. 8).

Проблема заключается в том, что соленость вод на поверхности Мирового океана варьируется в диапазоне всего 32-38 ‰ (или г/кг в современных единицах измерения солености), поэтому современной точности спутниковых методов в 0.3 ‰ и 7-ми летнего ряда наблюдений пока явно недостаточно для полноценных климатических исследований.

Кроме SMOS, с 2011 по июнь 2015 на орбите работал американо-аргентинский спутник Aquarius/SAC-D, измерявший соленость на поверхности океана (Lagerloef et al., 2008; Tzortzi et al., 2016), а 31 января 2015 г. был запущен спутник HACASMAP (Soil Moisture Active Passive), который, несмотря на свою нацеленность на измерение влажности почвы, будет давать информацию о поле солености поверхности Мирового океана (Brown et al., 2013).



Рисунок 8. Среднемесячная соленость Мирового океана и влажность почвы за ноябрь 2011 г. по данным SMOS (http://www.smos-bec.icm.csic.es/new combined map)

(3) Уровень океана

Среди дистанционных методов определения уровня океанов и морей в первую очередь следует выделить спутниковую альтиметрию как основной инструмент исследования изменчивости уровня по всей акватории океанов и внутренних морей, а не только у их побережья на метеостанциях и постах. Спутниковая альтиметрия относится к одному из активных методов дистанционного зондирования поверхности Земли с борта космического аппарата. Физические основы метода спутниковой альтиметрии достаточно просты. Зондирующий импульс, фронт которого является сферическим, посылается вертикально вниз, отражается от подстилающей поверхности (вода, суша или лед) и возвращается назад к антенне альтиметра (рис. 9). По разнице времени между моментом посылки радиоимпульса и его возврата t рассчитывается высота спутника над подстилающей поверхностью h=ct/2, где c – скорость света. На прохождение радиоимпульса альтиметра сильно влияет состояние атмосферы, которое выражается в увеличении времени возврата зондирующего сигнала, что приводит к ошибке определения положения спутника над поверхностью океана. Запаздывание сигнала связано с тем, что вследствие влияния атмосферы, происходит частичное рассеяние и поглощение радиоимпульса. Поэтому для анализа сигнала вводятся различные атмосферные, геофизические, приливные и инструментальные поправки. Более подробно ознакомиться с методом спутниковой альтиметрии можно в работах (Радиолокационные методы, 1980; Chelton et al., 2001; Rees, 2001; Askne, 2003; Seelye, 2004; Лебедев, Костяной, 2005; Vignudelli et al., 2011; Лебедев, 2014). Параметры орбит и общие характеристики всех спутников, проводящих альтиметрические измерения, приведены в (Лебедев, Костяной, 2005; Vignudelli et al., 2011; Лебедев, 2014).



Рисунок 9. Принципиальная схема альтиметрических измерений и основные поверхности, связанные с ними (Лебедев, Костяной, 2005)

Основные программы спутниковой альтиметрии можно условно разделить на два типа. Первые направлены на решение геодезических задач: уточнение формы и высот геоида и гравитационного поля Земли. Они получили название геодезических программ. Вторые – на осуществление мониторинга изменчивости высоты морской поверхности. Круг задач, которые могут решаться в рамках этих программ, достаточно широк – от различных океанологических задач до исследований глобальных изменений климата. Эти программы получили название изомаршрутных.

Изомаршрутные программы предполагают повторяемость трасс в пределах ± 1 км через определенный период (цикл) времени. Они позволяют реализовать режим повторных измерений по сетке равномерно расположенных по поверхности Земли треков. Изомаршрутные программы направлены в первую очередь на решение задач мониторинга пространственно-временной изменчивости высоты морской поверхности или уровня океана. Подспутниковые трассы для разных программ имеют разные расстояния между треками одного типа (восходящими или нисходящими) в зависимости от широты места.

Принципиальная схема измерений, проводимых альтиметром или радиовысотомером, представлена на рис. 9, на котором показаны различного рода поверхности, определяющие суть данного метода дистанцион-

ного зондирования из космоса. Отсчетный эллипсоид представляет собой эллипсоид вращения, центр которой совпадает с центром тяжести Земли. Одна из основных поверхностей, играющих решающую роль в геодезии, – это геоид, который по определению является эквипотенциальной (уровенной) поверхностью гравитационного поля Земли совпадающей с невозмущенной поверхностью океана. Уточнение высот геоида в открытом океане (или его формы) является одной из основных задач, для решения которой призвана спутниковая альтиметрия. Отклонение морской поверхности от геоида называется динамической топографией. Высота морской поверхности относительно отсчетного эллипсоида рассчитывается по высоте спутника над морем, полученной в результате обработки данных спутниковой альтиметрии, и по высоте орбиты самого спутника. Поверхность условно сглаживается, точнее усредняется по пятну радиосигнала, который имеет диаметр порядка 5 – 6 км. Поэтому ветровое волнение не измеряется, а косвенным образом рассчитывается (подробнее см. часть 2 настоящей статьи).

С 1992 г. по настоящее время регулярные альтиметрические измерения выполняются спутниками TOPEX/Poseidon, GFO-1, Envisat, Jason-1, Jason-2, Jason-3, Sentinel-3A и др. Для анализа межгодовой и сезонной изменчивости уровня Мирового океана, а также внутренних морей, например, Каспийского или Черного лучше использовать данные спутников TOPEX/Poseidon(T/P) и Jason-1, -2, -3 (J1/2/3), что обусловлено следующими причинами.

Точность измерения высоты спутника над морской поверхностью для этой программы составляет 1.7 см (Fu and Pihos, 1994), а точность расчета самой высоты моря относительно отсчетного эллипсоида для открытого океана – 4.2 см (разница в точности возникает из-за дополнительных ошибок в расчетах используемых поверхностей). Это – наилучший показатель по сравнению с другими программами альтиметрических измерений (Chelton et al., 2001). Расположение восходящих и нисходящих треков (внутри каждого 10-суточного цикла) по акваториям даже внутренних морей (например, Каспийского, Черного и Балтийского) оптимально, что позволяет анализировать изменчивость уровня вдоль треков с пространственным разрешением 5 – 6 км. Временной масштаб повторения измерений вдоль трека – 9.916 суток (т.е. примерно 3 раза в месяц или 6 раз в месяц в точках пересечения треков) – оптимален для исследования синоптической и сезонной изменчивости уровня океанов и морей (Лебедев, Костяной, 2005, 2016; Lebedev, Kostianoy, 2008; Kouraev et al., 2011, Лебедев, 2014; Kostianov et al., 2014).

Данные TOPEX/Poseidon представляют собой непрерывный и наиболее длинный по времени ряд измерений (с сентября 1992 г. по август 2002 г.). Этот ряд продлевают данными спутников Jason-1 (с января 2002 г. по февраль 2009 г.) и Jason-2 (с июля 2008 г. по настоящее время), расположение треков которых полностью совпадали с расположением треков спутников ТОРЕХ/Poseidon и Jason-1 до совершения ими маневра коррекции орбиты 19 августа 2002 г. и 2 февраля 2009 г., соответственно. Большинство баз данных спутниковой альтиметрии имеют одинаковую структуру. Всю информацию в них условно можно разбить на следующие группы, которые содержат:

(а) пространственно-временное положение спутника (геоцентрические координаты и ошибки их определения, время проведения измерений, результаты расчета высоты орбиты спутника относительно отсчетного эллипсоида);

(б) высоту спутника над подстилающей поверхностью, полученную в результате обработки времени возврата зондирующего импульса, или высоту моря относительно отсчетного эллипсоида;

(в) поправки, влияющие на время возврата зондирующего импульса (поправка на состояние подстилающей поверхности, поправки на влияние окружающей среды: ионосферная поправка, поправка на влажность, «сухая» тропосферная поправка);

(г) результаты анализа формы отраженного импульса (значимая высота ветровых волн, коэффициент обратного рассеяния, модуль скорости приводного ветра), что существенно расширяет круг применения спутниковой альтиметрии в научных и прикладных исследованиях;

(д) дополнительную геофизическую информацию (поправка обратного барометра, высоту геоида и средней морской поверхности, высоту приливов — морского, солнечного, твердой Земли и полюсного, данные батиметрии), необходимую для решения геофизических задач разных классов.

Более подробно с существующими базами данных спутниковой альтиметрии можно ознакомиться в работах (Лебедев, Костяной, 2005; Vignudelli et al., 2011; Лебедев, 2014). В РФ особенно следует выделить Интегрированную Базу Данных Спутниковой Альтиметрии Каспийского моря (ИБДСА – «Каспий»), которая создана совместно специалистами Геофизического Центра РАН и Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и внесена в Государственный регистр баз данных за № 0220611211 (Свидетельство № 10505 от 14 июля 2006 г.) (Лебедев, 2014).



Рисунок 10. Сезонная и межгодовая изменчивость уровня Каспия по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2 с января 1993 г. по декабрь 2015 г. Периоды роста уровня выделены желтым цветом (Лебедев, Костяной, 2016)

А.Г. Костяной

В РФ большое внимание уделяется комплексному изучению Каспийского моря (Kostianoy, Kosarev, 2005), что связано не только с интенсивным развитием добычи нефти (Zhiltsov et al., 2016), значительными изменениями регионального климата (Костяной и др., 2014а, б), но и с продолжающимися значительными колебаниями уровня Каспия, амплитуда которых за время инструментальных наблюдений (с 1837 г.) составила более 3 м (Kostianoy, Kosarev, 2005; Лебедев, Костяной, 2005, 2016; Lebedev, Kostianoy, 2008; Kouraev et al., 2011; Лебедев, 2014; Костяной и др., 2014а, б); методы измерения уровня моря рассмотрены в работе Костяной и др., 2012). На рис. 10 представлены результаты альтиметрических измерений среднего уровня Каспийского моря за период с 1993 г. по 2015 г.

С зимы 1992/1993 г. до лета 1995 г. наблюдался резкий рост уровня моря до отметки -26.4 м в Балтийской системе высот со скоростью 20 см/год. Затем до зимы 1997/1998 г. наблюдалось очередное резкое понижение до отметки -27.1 м со скоростью 22 см/год. Умеренное падение продолжилось до зимы 2001/2002 г. до отметки -27.4 м со скоростью 6 см/год. Последующий умеренный рост до отметки -26.7 м со скоростью 10 см/год наблюдался до лета 2005 г. С лета 2005 г. по зиму 2009/2010 гг. уровень моря умеренно падал до отметки -27.3 м со скоростью -8.5 см/год. Это падение продолжилось и в 2010 г. В 2010 – 2012 гг. скорость падения уровня Каспия увеличилась до 15 см/год и к марту 2013 г. уровень моря составил -27.6 м. Падение уровня Каспия продолжилось и в последующие годы, что отчетливо видно по спутниковым данным до конца 2015 г., когда уровень моря в июне достиг отметки -27.74 м, а уже в декабре -28.2 м (рис. 10). Поскольку в июне 2016 г. уровень моря находился на уровне -27.72 м, примерно на той же отметке, что и в июне 2015 г., то пока трудно говорить о стабилизации уровня Каспия. При этом следует отметить, что рост и падение уровня Каспийского моря происходит в разных частях моря по-разному, что объясняется разгидрометеорологическими личными И гидродинамическими факторами (Лебедев, Костяной, 2016).



Рисунок 11. Карта аномалий уровня Мирового океана на 7 июля 2004 г., построенная по данным спутниковой альтиметрии (https://i.ytimg.com/vi/SdsHpKAfzi0/maxresdefault.jpg)

С помощью альтиметрических данных строятся региональные и глобальные карты аномалий уровня океана и динамической топографии за различные сроки и с использованием данных различных спутниковых миссий. На рис.11 представлена карта аномалий уровня Мирового океана на 7 июля 2004 г., на которой отчетливо видны крупные антициклонические (положительные изолированные аномалии) и циклонические (отрицательные изолированные аномалии) вихри и меандры течений, а также такие мощные течения как Гольфстрим, Куросио, Агульясово и др. благодаря аномалиям в скорости и положении этих течений. Интерпретация таких карт в смысле изучения динамики вод осложняется тем, что мы имеем дело с аномалиями уровня, а не с самим уровнем океана (сам уровень близок к геоиду, который меняется в океане до сотни метров).

С сентября 1992 г. имеются многолетние альтиметрические наблюдения за уровнем Мирового океана, что позволяет исследовать сезонную и межгодовую изменчивость уровня океана в любой его точке, исследовать пространственную неоднородность изменения уровня (рис. 12), а также изучать глобальные осредненные характеристики изменчивости уровня в связи с глобальным изменением климата (рис. 13) (IPCC, 2013; Rhein et al., 2013). Последний график, в частности, показывает, что по данным спутниковой альтиметрии за период с 1993 по 2015 г. уровень Мирового океана в среднем растет со скоростью 3.3 мм в год. Однако, существует значительная пространственная неоднородность в изменении уровня Мирового океана, которая максимальна в тропической зоне западной Пацифики (до 10 мм/год) и минимальна (и даже отрицательна) в отдельных районах восточной, южной и северной части Тихого океана, Южного океана и Гольфстрима (рис.12).



Рисунок 12. Карта скорости изменения уровня Мирового океана (мм/год) за период с 1992 по 2013 г., построенная по данным спутниковой альтиметрии T/P, J1/2 (http://notrickszone.com/wp-content/uploads/2015/01/sea-level-rise-rate-western-pacific.png)



Рисунок 13. Межгодовая изменчивость уровня Мирового океана (мм) за период с 1993 по 2015 г. (http://www.slideshare.net/CFCC15/pre0082-cazenave-a)

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-50-00095). Автор благодарен научному сотруднику МГИ РАН (г. Севастополь) Д.М. Соловьеву за предоставленные инфракрасные спутниковые изображения Балтийского моря.

Список литературы

Гарбук С.В., Гершензон В.Е. 1997. Космические системы дистанционного зондирования Земли. – М., Издательство А и Б, 296 с.

География России. 2017. Электронный ресурс. URL: https:// geographyofrussia.com/set-meteostancij/.

Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А., 2011. Черное и Азовское моря: сравнительный анализ изменчивости температуры поверхности (1982 – 2009 гг., спутниковая информация). – Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, т. 8, № 4, с. 209 – 218.

Катцов В.М., Семенов С.М. (Ред.) 2014. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М., ИГКЭ, 1009 с.

Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А. 2014а. Климатические изменения гидрометеорологических параметров в морях России в 1979 – 2011 гг. – Труды ГГО, № 570, с. 50 – 87.

Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А., Шеремет Н.А. 2014б. Южные моря России. – В кн.: Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях

климата и их последствиях на территории Российской Федерации/ под.ред. С.М. Семенова, В.М. Катцова. – Москва, ИГКЭ, с. 644-683.

Костяной А.Г., Лебедев С.А., Терзиев Ф.С., Григорьев А.В., Никонова Р.Е., Филиппов Ю.Г. 2012. Глава 11: Моря. – В кн.: Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем/ под. ред С.М. Семенова, с. 430–478.

Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. 2011. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. – М., ИКИ РАН, 470 с.

Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. 2016. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. – М., ИКИ РАН, 334 с.

Лебедев С.А. 2014. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. Дисс. соиск. д.ф.-м.н. – М., ГЦ РАН, 350 с.

Лебедев С.А., Костяной А.Г. 2005. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. – М., Изд. центр «МОРЕ» Международного ин-та океана, 366 с.

Лебедев С.А., Костяной А.Г. 2016. Изменения уровня и динамики вод Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии. – В кн: Система Каспийского моря / под ред. Акад. А.П. Лисицына.– М., Научный мир, с. 13–41.

Mereoцентр. 2017. Электронный ресурс. URL: http://meteocenter.net/ world weather stations.htm.

Радиолокационные методы исследования Земли. 1980. /Под ред. Ю.А. Мельника. – М., Советское радио, 262 с.

Строительная климатология. 2003. СНиП 23-01-99* РФ (http://www.tgigroup.ru/upload/information_system_18/2/3/5/item_235/

information_items_property_118.pdf)

Толкачев А.Я. 2013. Глобальная система наблюдений за океаном. Электронный pecypc. URL: http://ocean.extech.ru/ioc/programs/gosno.php.

Askne J. (Ed.) 2003. Remote Sensing Using Microwaves.Chalmers University of Technology.Department of Radio and Space Science. – Gothenburg, Sweden, 253 p.

Barale V., Gower J. F. R., Alberotanza L. 2010. Oceanography from Space. – Springer Dordrecht, Heidelberg, London, New York. 375 p.

Brown M.E., Escobar V., Moran S., Entekhabi D., O'Neill P.E., Njoku E. G., Entin J.K. 2013. NASA's soil moisture active passive (SMAP) mission and opportunities for applications users. – Bulletin of the American Meteorological Society, No 94, pp. 1125 – 1128. URL: http:// dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00049.1.

Chelton D.B., Ries J.C., Haines B.J., Fu L.-L., Callahan P.S. 2001. Satellite Altimetry. – In: Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications. (Eds.) L.-L. Fu and A. Cazenave. – Academic Press, pp. 1 - 131.

Constable A.J. et al. 2016. Developing priority variables ("ecosystem Essential Ocean Variables" – eEOVs) for observing dynamics and change in Southern Ocean ecosystems. – Journal of Marine Systems, vol. 161, pp. 26-41. doi:10.1016/j.jmarsys.2016.05.003.

Feistel R., et al. 2016. Metrological challenges for measurements of key climatological observables: oceanic salinity and pH, and atmospheric humidity. Part 1: Overview. – Metrologia, vol. 53, No1, R1 – R11.

Fu L.-L., Cazenave A. (Eds.) 2001. Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications. – Academic Press, 463 p.

Fu L.-L., Pihos G. 1994. Determining the response of sea level to atmospheric pressure forcing using TOPEX/Poseidon data. – J. Geophys. Res., vol. 99, No C12, pp. 24633 – 24642.

IPCC 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 p.

Kalnay E. et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. – Bull. Amer. Met. Soc., vol. 77, No 3, pp. 437 – 471.

Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Kopelevich O.V., Kudryavtsev V.N., Lavrova O.Yu., Lebedev S.A., Mitnik L.M., Mityagina M.I., Smirnov V.G., Stanichny S.V., Troitskaya Yu. I. 2017. Ocean Remote Sensing in Russia. In: Comprehensive Remote Sensing, vol. 8: Ocean Remote Sensing. Elsevier (in press).

Kostianoy A.G., Kosarev A.N. (Eds.) 2005. The Caspian Sea Environment. – Springer, Heidelberg, 271 p.

Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Solovyov D.M. 2014. Satellite monitoring of the Caspian Sea, Kara-Bogaz-Gol Bay, Sarykamysh and Altyn Asyr Lakes, and Amu Darya River. In: The Turkmen Lake AltynAsyr and Water Resources in Turkmenistan. (Eds.) I.S. Zonn and A.G. Kostianoy. - Springer, Heidelberg, pp. 197 – 232.

Kouraev A.V., Cretaux J.-F., Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Sheremet N.A., Mamedov R., Zakharova E.A., Roblou L., Lyard F., Calmant S., Berge-Nguyen M. 2011. Satellite Altimetry Applications in the Caspian Sea. In: Coastal Altimetry. (Eds.) S. Vignudelli, A.G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. – Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 331 – 366. doi: 10.1007/978-3-642-12796-0 13.

Lagerloef G., Colomb F.R., Vine D.L., Wentz F., Yueh S., Ruf C., Swift, C. 2008. The Aquarius/SAC-D mission: Designed to meet the salinity remote-sensing challenge. – Oceanography, vol. 21, No 1, pp. 68 – 81.

Lebedev S.A., Kostianoy A.G. 2008. Integrated using of satellite altimetry in investigation of meteorological, hydrological and hydrodynamic regime of the Caspian Sea. – Journal of Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, vol. 19, Issue: 1 - 2, pp. 71 - 82.

Rees W.G. 2001. Physical Principles of Remote Sensing. 2nd Edition. – Cambridge University Press, 372 p.

Rhein, M.,S. R. Rintoul, S. Aoki, E. Campos, D. Chambers, R.A. Feely, S. Gulev, G.C. Johnson, S.A. Josey, A. Kostianoy, C. Mauritzen, D. Roemmich, L.D. Talley and F. Wang, 2013: Observations: Ocean. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin,

G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. pp. 255 – 315.

Seelye M. 2004. An Introduction to Ocean Remote Sensing. – Cambridge University Press, 454 p.

Tzortzi E., Srokosz M., Gommenginger Ch., Josey S.A. 2016. Spatial and temporal scales of variability in Tropical Atlantic sea surface salinity from the SMOS and Aquarius satellite missions. – Remote sensing of environment, No 180, pp. 418 - 430.

Vignudelli S., Kostianoy A.G., Cipollini P., Benveniste J. (Eds.) 2011. Coastal Altimetry. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 578 p. DOI:10.1007/978-3-642-12796-0.

Zhiltsov S.S., Zonn I.S., Kostianoy A.G. (Eds.) 2016. Oil and gas pipelines in the Black-Caspian Seas Region. – Springer International Publishing AG, Switzerland, 288 p. DOI 10.1007/978-3-319-43908-2.

Статья поступила в редакцию: 10.02.2017

После переработки: 19.03.2017