\_

\_

=

## Номер 2, 2021

-

Методы и средства обработки и интерпретации космической информации	
Регистрация из космоса аномальных вариаций линеаментных систем Байкальской рифтовой зоны в период землетрясения с магнитудой M = 5.6, состоявшегося 21 сентября 2020 года	
В. Г. Бондур, Е. В. Гапонова	3
Многомодельное оценивание динамики фитомассы растительных сообществ тундры на основе спутниковых снимков	
В. В. Михайлов, А. В. Спесивцев, В. А. Соболевский, Н. К. Карташев, И. А. Лавриненко, О. В. Лавриненко, В. А. Спесивцев	15
Определение маски ледяного покрова Дальневосточных морей по данным прибора MCУ-MP спутника "Метеор-М" № 2	
М. О. Кучма, З. Н. Лотарева, Л. А. Слесаренко	31
Детектирование облачности по данным КА Himawari-8 с применением сверточной нейронной сети	
А. И. Андреев, Ю. А. Шамилова	42
Открытая программная реализация и валидация метода расщепленного окна прозрачности для автоматизированного восстановления температуры поверхности земли по данным Landsat 8	
Э. Э. Казаков, Ю. И. Борисова	53
Космические аппараты, системы и программы ИЗК Сопоставление наземных и космических разномасштабных температурных данных на примере городов Российской Арктики для зимних условий	
М. И. Варенцов, М. Ю. Грищенко, П. И. Константинов	64
Использование космической информации о Земле	
Исследование водного питания оз. Большое Турали с применением космических снимков	
С. И. Шапоренко, С. Л. Десинов	77
Краткие сообщения	
Спутниковый мониторинг изменений субаквальных ландшафтов Зейского водохранилища	
Н. М. Легачева, А. А. Шехирев	87
История	
История	
Первый советский метеорологический спутник (к 60-летию начала разработки спутников серии "Метеор")	
Л. А. Ведешин	94
Памяти Олега Викторовича Копелевича	96

## No 2, 2021

Ξ

Methods and Means of Space Data Processing and Interpretation	
Registering from Space Anomalous Variations of Baikal Rift Zone Lineament Systems during the $M = 5.6$ Earthquake Occurred on September 21, 2020	
V. G. Bondur, E. V. Gaponova	3
Multi-Model Evaluation of Phytomass Dynamics of Tundra Plant Communities Based on Satellite Images	
V. V. Mikhailov, A. V. Spesivtsev, V. A. Sobolevsky, N. K. Kartashev, I. A. Lavrinenko, O. V. Lavrinenko, V. A. Spesivtsev	15
Ice Cover Detection of the Far Eastern Seas Using the MSU-MR Instrument of the Meteor-M No. 2 Satellite	
M. O. Kuchma, Z. N. Lotareva, L. A. Slesarenko	31
Cloud Detection Using Himawari-8 Satellite with a Convolutional Neural Network	
A. I. Andreev, Yu. A. Shamilova	42
Open Source Software Implementation and Validation of Split-Window Method for Automated Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Data	
E. E. Kazakov, Yu. I. Borisova	53
Comparison between <i>In Situ</i> and Satellite Multiscale Temperature Data for Russian Arctic Cities for Winter Season	
M. I. Varentsov, M. Yu. Grischenko, P. I. Konstantinov	64
Utilization of the Earth Space Data	
Research of Water Supply of Lake Bolshoye Turali Using Space Images	
S. I. Shaporenko, S. L. Desinov	77
Short Communications	
Satellite Monitoring: The Changes of Subaqueous Landscapes of the Zeya Reservoir	
N. M. Legacheva, A. A. Shehirev	87
History	
The First Soviet Meteorological Satellite (On the 60th Anniversary of the Beginning of Development of Satellites of the Meteor Series)	
L. A. Vedeshin	94
In Memory of Oleg Viktorovich Kopelevich	96

### \_\_\_\_\_ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ \_\_\_\_\_ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

## РЕГИСТРАЦИЯ ИЗ КОСМОСА АНОМАЛЬНЫХ ВАРИАЦИЙ ЛИНЕАМЕНТНЫХ СИСТЕМ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ В ПЕРИОД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С МАГНИТУДОЙ М = 5.6, СОСТОЯВШЕГОСЯ 21 СЕНТЯБРЯ 2020 ГОДА

#### © 2021 г. В. Г. Бондур<sup>а, \*</sup>, Е. В. Гапонова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга "АЭРОКОСМОС", Москва, Россия \*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 28.01.2021 г.

В настоящей работе приводятся результаты исследований аномальных вариаций линеаментных систем в период подготовки землетрясения с магнитудой 5.6, которое произошло 21 сентября 2020 г. вблизи оз. Байкал в 21 км от поселка Култук на глубине 10 км. Описана методика проведения исследований, путем автоматизированного линеаментного анализа космических изображений. Проанализированы особенности строения Байкальской рифтовой зоны и ее сейсмическая активность. На основании обработки ряда космических изображений, полученных со спутника Terra (аппаратура MODIS) за период времени с 25 мая по 6 октября 2020 г., построены схемы линий вытянутости штрихов, схемы региональных линеаментов и их розы-диаграммы, а также рассчитаны суммарные длины локальных линеаментов и отношения их длин для разных направлений, позволившие выявить аномальные вариации линеаментных систем за 14 и за 5 дней до землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г. Сделан вывод о принадлежности этих аномалий к геодинамическим предвестникам землетрясения.

*Ключевые слова*: космические изображения, дистанционное зондирование, землетрясения, сейсмоопасные территории, геодинамика, линеаменты, байкальская рифтовая зона

DOI: 10.31857/S0205961421020020

#### введение

Актуальность решения проблемы предупреждения и прогнозирования землетрясений не вызывает сомнений, так как это позволит снизить негативные последствия, наносимые такими опасными природными явлениями (Киссин, 2013; Моги, 1988; Keilis-Borok et al., 2009). Для решения этой проблемы большое значение имеют поиск и регистрация предвестников значительных сейсмических событий (с магнитудами M > 5) (Соболев, Пономарев, 2003). Одним из наиболее перспективных подходов к регистрации различных предвестников землетрясений на обширных сейсмоопасных территориях является использование методов и средств дистанционного зондирования (Бондур и др., 2009, 2020; Tronin, 2010) и обработки данных (Бондур, 2014).

В настоящее время известен ряд методов регистрации из космоса предвестников различной физической природы, среди них такие как: методы выявления вариаций параметров ионосферы (Бондур, Смирнов, 2005; Пулинец и др., 2010), методы регистрации тепловых аномалий (Бондур, Воронова, 2012; Бондур и др., 2020; Бондур и др., 2018: Ouzounov et al., 2007), методы спутниковой радиоинтерферометрии (Бондур и др., 2021), методы регистрации изменений характера линеаментных систем (Бондур, Зверев, 2005а, б, 2007; Бондур и др., 2016; Гапонова и др., 2019; Bondur, Kuznetsova, 2005), методы совместного анализа аномалий различных геофизических полей, регистрируемых из космоса (Бондур и др., 2018, 2020). Кроме того, для решения проблем исследования сейсмоопасных территорий используются методы, основанные на использовании геомеханических моделей (Бондур и др., 2007, 2010, 2016; Bondur et al., 2020), а для прогноза землетрясений различные методы (Keilis-Borok et al., 2009), в том числе метод сейсмической энтропии (Акопян и др., 2017) и др.

Одними из перспективных предвестников значительных сейсмических событий (магнитуды M > 5) являются линеаментные системы, выявляемые путем обработки космических изображений (Бондур, Зверев, 2005а, б, 2007; Бондур и др., 2016). Эти системы играют важную роль при создании структурных моделей эпицентральных зон крупных землетрясений и определении кинематики активных разломов. Анализ линеаментных систем позволяет выявить особенности подготовки землетрясений и афтершоковых процессов (Бондур, Зверев, 2007; Бондур и др., 2016; Гапонова и др., 2019).

Дистанционное зондирование предоставляет возможности детального изучения обширных территорий, что может оказаться решающим фактором в понимании того, как напряжения, возникающие на границах тектонических плит, например в зонах коллизий, передаются в литосфере на большие расстояния, что и приводит в модели "тектоники плит" к формированию внутриконтинентальных сейсмоактивных регионов (Аэрокосмические, 2000; Бондур и др., 2009; Кац и др., 1980).

Современные методы выявления и изучения линеаментов сводятся к автоматизированному дешифрированию космических изображений с использованием набора различных дешифровочных признаков (Бондур, 2014; Бондур, Зверев, 2007). Космические изображения обладают такими свойствами, как большая обзорность, объективность отображения характера земной поверхности и естественная генерализация (Бондур и др., 2009; Аэрокосмические..., 2000). В связи с этим они являются тем материалом, который позволяет наиболее полно и всесторонне оценить степень тектонической нарушенности земной коры (Кац и др., 1986; Бондур, Зверев, 2007). Чем ниже пространственное разрешение космических изображений, тем выше уровень генерализации и тем более глубинные структуры отображаются на них (Аэрокосмические..., 2000; Корчуганова, Корсаков, 2009). Поэтому для мониторинга процессов, предшествующих землетрясению, целесообразно использовать изображения с пространственным разрешением порядка первых сотен метров. Благодаря такой генерализации, появляется возможность отслеживания динамики широких линеаментных зон, соответствующих целым системам разломов (Бондур, Зверев, 2005а, б, 2007).

Степень выраженности на космических изображениях разноориентированных зон в линеаментных системах, т.е. их "физиономичность", различна. Она зависит как от уровня генерализации и спектральных диапазонов этих изображений, так и от петрофизических контрастов, обусловленных разной обводненностью зон трещиноватости и прилегающих горных пород (Бондур, Зверев, 2007). Так как оптические контрасты сухих и сырых грунтов увеличиваются с увеличением длины волны, то при выделении линеаментов целесообразнее использовать красную или ближнюю инфракрасную зону спектра электромагнитных волн (Бондур, Зверев, 2005б, 2007; Бойков, Корниенко, 2007). Таким образом, для мониторинга аномальных вариаций линеаментных систем в сейсмоопасных регионах наиболее оптимальными источниками данных являются космические изображения среднего разрешения красной или ближней инфракрасной зоны спектра электромагнитных волн, получаемые с высокой периодичностью (Бондур, Зверев, 2007; Бондур и др., 2016).

В настоящей статье приведены результаты исследования аномальных вариаций линеаментных систем Байкальской рифтовой зоны в период подготовки и свершения землетрясения с магнитудой M = 5.6, которое произошло 21 сентября 2020 г., с использованием методов автоматизированного линеаментного анализа космических изображений.

#### ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ИССЛЕДУЕМОГО РЕГИОНА

Байкальская впадина рассматривается как внутриконтинентальный рифт. Рифтовые впадины часто вмещают крупные озера. Эти линейные грабеновые структуры ограничены с одной или двух сторон разломами (сбросами и сдвигами) и разделены перемычками, в которых на поверхность выходят древние породы фундамента (Актуальные..., 2005). Впадины вместе с осложняющими ее структурами и сопровождающими горными поднятиями (плечами) и составляют рифт (Мацидр., 2014). Рифты формируются в условиях напряжений растяжения, тогда как все структуры континентальной земной коры существуют в условиях сжатия. Вследствие этого блоки, разделенные рифтом, отдаляются друг от друга, что на ранней стадии развития и приводит к образованию континентальных впадин, которые разделяют отодвигающиеся блоки. Особенности строения Байкальской впадины, вещественный состав ее донных отложений, а также протекающие в них физико-химические процессы и явления свойственны океанам и неизвестны в других пресноводных озерах (Мац и др., 2014).

По геологическим и геофизическим данным установлено, что Байкальская рифтовая зона, протяженностью более 2000 км, расположена на сочленении двух контрастных по температурным и механическим свойствам литосферных мегаблоков: Сибирской платформы и Центрально-Азиатского подвижного пояса. Рифтовая система составлена из сложной последовательности впадин (15 отдельных впадин), разделенных поднятиями (межвпадинными перемычками) и ограниченных крупными тектоническими разломами, параллельными рифту, секущих рифт и свидетельствующих о сложнейшей истории растяжения рифта (Байкал..., 2009). Сибирская платформа является крупным и достаточно стабильным мегаб-



Рис. 1. Эпицентры землетрясений на территории Байкальской рифтовой зоны с M > 5 за последние 70 лет.

локом со слабой сейсмической активностью. Центрально-Азиатскому подвижному поясу свойственна рассеянная сейсмичность, свидетельствующая о мозаичном сочленении отдельных микроплит и блоков, располагающихся между тремя литосферными плитами – Индостанской, Евразийской и Амурской. Байкальская система рифтовых разломов и впадин характеризуется концентрированной сейсмичностью, тяготеющей к байкальским впадинам (Актуальные..., 2005). Для Байкальской рифтовой системы принципиальное значение в структурном плане придается Главному Саянскому, Тункинскому, Приморскому, Баргузинскому, Кичерскому, Верхне-Муйскому, Кодарскому, Токкинскому и некоторым другим разломам. Большинство из выделенных разломов структуры глубинного заложения (Лунина и др., 2007).

Структурное положение и динамика разломов в Байкальской рифтовой зоне являются следствием перемещения сосуществующих внутриконтинентальных литосферных блоков в юго-восточном направлении для центральной части Байкальской рифтовой зоны и правосторонних взбросо-сдвиговых смещений Восточного Саяна относительно Сибирской платформы (Вилор и др., 2015). На юго-западном фланге рифта векторы смещений отражают поворот Тувино-Саянской части по часовой стрелке со сдвигами по Главному Саянскому разлому и Тункинскому разлому при участии растяжения. В высокосейсмичной срединной части рифтовой зоны, включающей Байкальскую и Баргузинскую впадины, субгоризонтальные оси растяжения, поперечные к преобладающим структурам, определяют сбросовый тип разломов, в том числе Баргузинского (Актуальные..., 2005; Вилор и др., 2015). Все крупнейшие региональные разломы Байкальской рифтовой зоны отличаются ярко проявленной кайнозойской активиазацией, считаются долгоживущими и заложены по древним разломным зонам. Кайнозойская активизация региональных разломных зон способствовала развитию Байкальской рифтовой системы (Байкал...., 2009).

Байкальский регион имеет высокую сейсмичность — это одна из наиболее сейсмически активных внутриконтинентальных областей планеты. В среднем каждый год здесь происходит около 10 землетрясений различной силы. За последние 70 лет на территории Байкальской рифтовой зоны произошло более 600 землетрясений (по данным https://earthquake.usgs.gov), из которых более 70 сильных с M > 5 (см. рис. 1).

В настоящей работе исследовано землетрясение с магнитудой M = 5.6, которое произошло 21 сентября 2020 г. (18:04:57 UTC) вблизи оз. Байкал. Очаг землетрясения располагался в 21 км от поселка Култук (51.857° с.ш., 103.480° в.д.) на глубине 10 км.

Таблица 1. Данные о землетрясениях, произошедших вблизи оз. Байкал в период времени июль-сентябрь 2020 г.

Дата	Магнитуда	Широта	Долгота
06.07.2020	4.3	51.732°	104.677°
24.07.2020	4.5	53.318°	108.708°
31.07.2020	4.1	51.729°	98.196°
24.08.2020	4.4	53.424°	109.785°
13.09.2020	4.4	54.800°	111.935°
21.09.2020	5.6	51.857°	103.480°
21.09.2020	4.6	51.790°	103.494°

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первым шагом при проведении исследований являлся сбор, обработка и анализ космических изображений для обнаружения линейных элементов (штрихов). Методы обнаружения таких элементов на космических изображениях состоят в анализе локальных участков фрагментов этих изображений (окон) (Bondur, Kuznetsova, 2005) и в поиске в этих окнах отрезков прямых линий или прямых границ областей разной оптической плотности путем построения так называемых масок (Zlatopolsky, 1992). При этом предполагается, что штрихи делят изображение в окнах на группы элементов, которые различаются по яркости, а в масках указывается, как должны располагаться элементы этих групп, если в окне имеется прямая граница или линия определенного направления (Бондур, Зверев, 2005б; Zlatopolsky, 1992, 1997).

Сравнение фрагментов изображений в окнах с заданными масками происходит следующим образом. Вычисляется средняя яркость фрагментов изображения, соответствующих однотипным элементам масок, и определяются разности этих средних, которые называются откликами масок. Абсолютная величина отклика характеризует интегральное сходство маски и изображения в окне (Zlatopolsky, 1992, 1997). Описанная операция представляет собой согласованную линейную пространственную фильтрацию изображений. При этом для каждой точки штрихов определяется направление с дискретностью 22.5° (Златопольский, 2008; Zlatopolsky, 1997). На полутоновых изображениях выделяются прямые участки границ областей разной яркости. В цифровых моделях рельефа выявляются спрямленные участки границ склонов (Zlatopolsky, 1992, 1997).

Вторым шагом проведения исследований являлся анализ совокупности выделенных штрихов. Задавая регулярную сетку областей или строя области интерактивно, пользователь имел возможность получать розы-диаграммы штрихов. Для этого внутри каждой области находилось число точек в штрихах каждого направления. Далее в интерактивном режиме просматривались полученные результаты. Задавался порог выраженности линеаментов и на фоне исходного изображения выделялись штрихи, которые формируют линеаменты с указанными характеристиками. При увеличении порога остаются наиболее выраженные (проявленные на космическом изображении) сквозные прямые-линеаменты (Златопольский, 2008). Для совместного анализа могут комбинироваться изображения линеаментов с разной ориентацией и выраженностью (Бондур, Зверев, 2005а, б).

В отличие от визуального дешифрирования, в нашем случае выделялись не генерализованные мелкие штрихи, образующие линеаменты, а наиболее выраженные сквозные линеаменты. При этом обеспечивалась возможность изучения внутренней структуры крупных линеаментов. Изменяя ширину полосы поиска линеаментов, имелась возможность выделять широкие линейные зоны сгущения мелких штрихов, оценивать соотношение разрывных зон по ширине.

На следующем этапе проведения исследований выполнялся статистический анализ выявленных линеаментных систем, который позволяет получить скрытую информацию, касающуюся закономерностей пространственного распределения линейных текстур. С использованием этих данных производится анализ геодинамических особенностей исследуемой сейсмоопасной территории.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Исследуемое землетрясение с магнитудой M = 5.6 произошло 21 сентября 2020 г. в период повышенной сейсмической активности в байкальской рифтовой зоне.

На рис. 2 показано расположение эпицентра землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г. и разломное строение Байкальской рифтовой зоны (Лунина и др., 2007).

В табл. 1 приведены данные о землетрясениях, произошедших вблизи оз. Байкал в июле–сентябре 2020 г., которые могли получить отражение в аномальных вариациях линеаментных систем в исследуемый период.

В процессе проведения исследований выполнялся автоматизированный линеаментный анализ космических изображений, полученных со спутника Terra (аппаратура MODIS, пространственное разрешение 250 метров), начиная за 4 мес. до землетрясения и через 16 дней после него (25 мая; 28 июня; 21 июля; 13 августа; 7, 16, 23 сентября и 6 октября 2020 г.). Изучался участок, раз-



**Рис. 2.** Схема расположения эпицентра землетрясения (обозначено звездочкой), произошедшего 21 сентября 2020 г. вблизи оз. Байкал, и разломное строение Байкальской рифтовой зоны.

мером 100 × 100 км (400 × 400 пикселей), в эпицентральной области сейсмического события, состоявшегося 21 сентября 2020 г.на границе Тункинского рифта, расположенного на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны. Эпицентр землетрясения попадал в центр исследуемого участка земной поверхности.

Линеаменты, выделяемые при автоматизированной обработке космических изображений, подразделяются на региональные (сквозные), объединенные в линейные системы большой протяженности и локальные (штрихи), имеющие меньшую протяженность и более детально отражающие структуру рельефа. На основании детального изучения трещиноватости по космическим изображениям были построены линии вытянутости штрихов, сквозные (региональные) линеаменты, розы-диаграммы региональных линеаментов и анализировались особенности их распределения в пределах фрагментов изображений эпицентральной области. Схемы региональных линеаментов и их розы-диаграммы для эпицентральной области исследуемого землетрясения, полученные в результате автоматизированного линеаментного анализа разновременных космических изображений при пороге, равном 120, представлены на рис. 3. Такой порог выбирался из условия начала проявления региональных линеаментов в процессе обработки космических изображений.

Из анализа результатов обработки ряда космических изображений, представленных на рис. 3, следует, что в исследуемом сейсмоопасном районе преимущественное развитие имеют диагональные системы линеаментов, связанные с планетарной системой трещиноватости, а также широтные и субширотные направления линеаментов. Эта картина полностью согласуется с общим строением исследуемой территории, так как внутри Тункинской рифтовой долины главную роль играют северо-восточные и субширотные разрывные нарушения (Лунина и др., 2007). Субширотные разрывы имеют широкое распространение на всей исследуемой территории, в то время как меридиональные разрывы наименее развиты по сравнению со всеми остальными. Анализ рис. 3 свидетельствует о том, что в межвпадинных перемычках наряду с субширотными хорошо проявляются разломы северо-западного простирания.

Из анализа роз-диаграмм региональных линеаментов, приведенных на рис. 3, следует, что при приближении к моменту землетрясения, состоявшегося 21 сентября 2020 г., происходит постепенное увеличение количества диагональных линеаментных систем северо-западного—юго-восточного, а также северо-восточного—юго-запад-

#### БОНДУР, ГАПОНОВА

Фрагмент изображений 400 × 400 пикселей (100 × 100 км)



**Рис. 3.** Схемы и розы-диаграммы региональных (сквозных) линеаментов для землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г. вблизи оз. Байкал с магнитудой 5.6.

ного направлений и их уменьшение после землетрясения. Максимальный рост диагональных линеаментных систем наблюдался 7 сентября 2020 г., то есть за 14 дней до исследуемого сейсмического события. Подобное закономерное изменение может являться предвестником землетрясения (Бондур, Зверев, 2005а, б, 2007).

Линии вытянутости, являющиеся наглядной формой представления основных ориентационных свойств линеаментов, обусловлены морфоструктурным и разломно-блоковым строением исследуемой территории, которая захватывает прилегающую территорию юго-западной части оз. Байкал и часть Тункинского рифта. Этот рифт простирается в субширотном направлении более чем на 200 км от оз. Байкал до оз. Хубсугул. Разломно-блоковое строение Тункинского рифта и прилегающей территории определяется разрывными нарушениями четырех направлений: субширотного, северо-восточного, северо-западного и субмеридионального (Лунина, и др., 2007).

На рис. 4 приведены схемы линий вытянутости штрихов для исследуемого сейсмоопасного района. Как видно из рис. 4, линии вытянутости начинают сгущаться и объединяться 7 сентября 2020 г. (за 2 нед. до сейсмического события, состоявшегося 21 сентября 2020 г.). При этом преимущественное развитие имеют субширотные направления линий вытянутости (см. рис. 4).

Анализ суммарных длин штрихов, осредненных по каждому из восьми направлений (через

22.5°), показал, что величины сумм длин штрихов образуют следующий ряд в порядке убывания:  $L 90^{\circ}, L 293^{\circ}, L 67^{\circ}, L 45^{\circ}, L 315^{\circ}, L 22^{\circ}, L 0^{\circ}, L 338^{\circ}$  (см. табл. 2). При этом преобладающими являются широтные ( $L 90^{\circ}$ ), субширотные ( $L 293^{\circ}, L 67^{\circ}$ ) и диагональные ( $L 45^{\circ}, L 315^{\circ}$ ) направления линеаментов, совпадающие с простиранием основных морфоструктур региона.

Из анализа табл. 2 следует, что при приближении к моменту землетрясения для преобладающих направлений штрихов ( $L 90^\circ$ ,  $L 293^\circ$ ,  $L 67^\circ$ ,  $L 45^\circ$ ,  $L 315^\circ$ ) характерна общая тенденция увеличения их суммарных длин и постепенное их уменьшение после землетрясения. Для остальных направлений ( $L 22^\circ$ ,  $L 0^\circ$ ,  $L 338^\circ$ ) происходит обратная картина, при которой характерна общая тенденция уменьшения суммарных длин штрихов к моменту землетрясения и увеличения после него.

Таким образом, к моменту землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г., увеличивается проявленность (выраженность) штрихов, согласных с простиранием основных морфоструктур региона, и уменьшается проявленность поперечных к ним штрихов. Данные изменения длин локальных линеаментов разных направлений, предшествующих сейсмическому событию, произошедшему 21 сентября 2020 г. вблизи оз. Байкал, являлись предвестником этого сейсмического события. Фрагмент изображений 400 × 400 пикселей (100 × 100 км)



Рис. 4. Схемы линий вытянутости штрихов для землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г. вблизи оз. Байкал.

С использованием данных, приведенных в табл. 2, построены отношения длин локальных линеаментов разных направлений (рис. 5).

Из анализа рис. 5 видно, что отношения длин локальных линеаментов разных направлений начинали расти или уменьшаться по мере приближения к моменту землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г., и достигали пика 16 сентября 2020 г. Таким образом, аномальные вариации линеаментных систем байкальской рифтовой зоны, выявленные по отношениям длин штрихов разных направлений, проявлялись за 5 дней до землетрясения с магнитудой M = 5.6, произошедшего 21 сентября 2020 г.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследуемое землетрясение с магнитудой M = 5.6 произошло 21 сентября 2020 г. вблизи оз. Байкал в период повышенной сейсмической активности, что повлияло на выраженность линеаментных систем и получило отражение в их аномальных вариациях.

На основании анализа схем региональных линеаментов и их роз-диаграмм, выявленных путем автоматизированной обработки космических изображений при пороге 120, установлено, что в период подготовки и протекания этого сейсмического события преимущественное развитие имели диагональные системы линеаментов, связанные с планетарной системой трещиноватости, а также широтные и субширотные направления линеаментов, которые согласуются с общим строением исследуемой территории. При приближении к моменту землетрясения происходило постепенное увеличение количества диагональных линеаментных систем северо-западного-юго-восточного, а также северо-восточного-юго-западного направлений и их уменьшение после землетрясения. Максимальный рост диагональных линеаментных систем наблюдался 7 сентября 2020 (за 14 дней до исследуемого сейсмического события),

**Таблица 2.** Значения суммарных длин штрихов разных направлений *L* (в км) для периода времени с 25 мая по 6 октября 2020 г.

Δριμιντ	Дата								
Азимут	25.05.20	28.06.20	21.07.20	13.08.20	07.09.20	16.09.20	23.09.20	06.10.20	
90°	1096	1125	1140	1184	1290	1168	1135	1245	
67°	892	1041	1115	1077	1183	1172	1036	1070	
45°	818	943	1023	976	1058	968	919	851	
22°	732	776	823	812	775	663	694	606	
$0^{\circ}$	817	776	819	746	684	525	647	658	
338°	732	646	696	623	599	478	631	738	
315°	762	779	888	774	888	785	844	956	
293°	1018	963	1022	1054	1220	1137	1160	1233	



**Рис. 5.** График отношений длин локальных линеаментов разных направлений для землетрясения с магнитудой M = 5.6, произошедшего 21 сентября 2020 года вблизи оз. Байкал.

что может являться предвестником землетрясения.

Выявлено, что линии вытянутости, которые являются наглядной формой представления основных ориентационных свойств линеаментов, также начинали сгущаться и объединяться за 2 нед. до исследуемого сейсмического события (7 сентября 2020). На основании их анализа показано, что в исследуемом сейсмоопасном регионе преимущественное развитие имели субширотные направления, которые обусловлены морфоструктурным и разломно-блоковым строением исследуемой территории.

Анализ суммарных длин штрихов, выявленных по космическим изображениям, показал, что преобладающими являются широтные (L 90°), субширотные (L 293°, L 67°) и диагональные (L 45°, L 315°) направления линеаментов, совпадающие с простиранием основных морфоструктур региона. При приближении к моменту землетрясения выраженность линеаментов согласных с простиранием основных морфоструктур региона увеличивалась, а поперечных к ним линеаментов уменьшалась, что проявлялось в общей тенденции увеличения суммарных длин штрихов для преобладающих направлений и тенденции их уменьшения для остальных направлений (L 22°, L 0°, L 338°).

Аномальные вариации линеаментных систем байкальской рифтовой зоны, проявленные в отношениях длин штрихов разных направлений, были обнаружены 16 сентября 2020 г., т.е. за 5 дней до землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г.

На основании результатов исследований аномальных вариаций линеаментных систем было установлено, что максимальный рост и сгущение линеаментных систем, зафиксированных на схемах линий вытянутости штрихов, схемах региональных линеаментов и их роз-диаграмм, наблюдались за 14 дней до сейсмического события, а максимальные изменения величин суммарных длин штрихов и их отношений, наблюдались за 5 дней до землетрясения, произошедшего 21 сентября 2020 г.

Таким образом, автоматизированный линеаментный анализ космических изображений позволил выявить все основные направления линеаментов согласных с общим разломно-блоковым строением Байкальской рифтовой зоны, а также их предвестниковое изменение в период подготовки и свершения исследуемого землетрясения. Такой анализ является одним из эффективных методов выявления предвестников землетрясений, обладающих большой оперативностью и достоверностью для мониторинга сейсмоопасных территорий.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в НИИ "АЭРОКОСМОС" в рамках проекта № АААА-А19-119081390037-2.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акопян С.Ц., Бондур В.Г., Рогожин Е.А. Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // Физ. Земли. 2017. № 1. С. 4–53.

https://doi.org/10.7868/S0002333717010021

Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2005. 297 с.

Аэрокосмические методы геологических исследований. Гл. ред. А.В. Перцов. СПб: ВСЕГЕИ, 2000. 315 с.

Байкал: природа и люди: энциклопедический справочник / Байкальский институт природопользования СО РАН, (отв. ред. А.К. Тулохонов). Улан-Удэ: ЭКОС: изд-во БНЦ СО РАН, 2009. 608 с.

Бондур В.Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 3–17.

Бондур В.Г., Воронова О.С. Вариации уходящего длинноволнового излучения при подготовке и протекании сильных землетрясений на территории России в 2008 и 2009 году // Изв. вузов. Геодезия и Аэрофотосъемка. 2012. № 1. С. 79–85.

Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л. Геомеханические модели и ионосферные вариации для крупнейших землетрясений при слабом воздействии градиентов атмосферного давления // Докл. АН. 2007. Т. 414. №4. С. 540–543.

Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В. Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // Физ. Земли. 2016. № 1. С. 120–132. https://doi.org/10.7868/S000233371601004X

Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В. Связь между вариациями напряженнодеформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // Докл. АН. 20106. Т. 430. № 3. С. 400–404.

Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Докл. АН. 2005а. Т. 402. № 1. С. 98–105. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // Исслед. Земли из космоса. 20056. № 3. С. 37–52.

Бондур В.Г., Зверев А.Т. Механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 47–56.

Бондур В.Г., Зверев А.Т., Гапонова Е.В. Предвестниковая изменчивость линеаментных систем, выявляемых по космическим изображениям, в период сильных землетрясений // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 3. С. 3–12.

Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М: Научный мир, 2009. 692 с., 22 цв. ил.

Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Докл. АН. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.

Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С. Систематизация ионосферных, геодинамических и тепловых предвестников сильных землетрясений (М ≥ 6), регистрируемых из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 4. С. 3–20.

Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С. Совместный анализ аномалий различных геофизических полей, регистрируемых из космоса, при подготовке сильных землетрясений в Калифорнии // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 5. С. 3–24.

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Тубанов Ц.А., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Анализ динамики блоково-разломной структуры в районе землетрясений 2008 и 2020 гг. на южном Байкале методами спутниковой радиоинтерферометрии // Докл. АН. 2021. В печати.

Бойков А.М., Корниенко С.Г. Проявление сейсмогенерирующих линеаментов Дагестана в данных космической тепловой съемки: Теория и эксперимент // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2007. № 51. С. 68–76.

Вилор Н.В., Адрулайтис Л.Д., Зарубина О.В., Данилов Б.С. Геохимия сейсмоактивных региональных разломов (Байкальская рифтовая зона, Восточная Сибирь) // Геохимия. 2015. № 1. С. 64–82

Гапонова Е.В., Зверев А.Т., Цидилина М.Н. Выявление аномалий линеаментных систем по космическим изображениям во время сильных землетрясений в Калифорнии с магнитудами 6.4 и 7.1 // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 36–47.

Златопольский А.А. Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA) // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 102– 112.

Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М. Использование данных дистанционного зондирования участков земной коры для анализа геодинамической обстановки. М.: ГЕОС, 2015. 112 с.

*Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф.* Основы линеаментной тектоники. М.: Недра, 1986. 134 с. Киссин И.Г. О системном подходе в проблеме прогноза землетрясений // Физ. Земли. 2013. № 4. С. 145–160. https://doi.org/10.7868/S0002333713040054

Корчуганова Н.И., Корсаков А.К. Дистанционные методы геологического картирования: учебник / Н.И. Корчуганова, А.К. Корсаков. М.: КДУ, 2009. 288 с.

Лунина О.В., Гладков А.С., Шерман С.И. Вариации полей напряжений Тункинского рифта (Юго-западное Прибайкалье) // Геотектоника. 2007. № 3. С. 69–96.

Мац В.Д., Гранина Л.З., Ефимова И.М. Байкальский рифт: на пути к океану / В.Д. Мац, Л.З. Гранина, И.М. Ефимова // Природа: ежемесячный естественнонаучный журн. 2014. № 2. С. 28–38

*Моги К.* Предсказание землетрясений. М.: Мир. 1988. 382 с.

Пулинец С.А., Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова М.В. Проверка концепции сейсмо-ионосферных связей в спокойных гелиогеомагнитных условиях на примере Венчуаньского землетрясения в Китае 12 мая 2008 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. № 2. С. 240– 252.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.

Bondur V.G., Gokhberg M.B., Garagash I.A., Alekseev D.A. Revealing Short-Term Precursors of the Strong M > 7Earthquakes in Southern California From the Simulated Stress–Strain State Patterns Exploiting Geomechanical Model and Seismic Catalog Data // Frontiers in Earth Science. 2020. V. 8:571700.

https://doi.org/10.3389/feart.2020.571700

*Bondur V., Kuznetsova L.* Satellite Monitoring of Seismic Hazard Area Geodynamics Using the Method of Lineament Analysis // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 376–379.

*Keilis-Borok V., Gabrielov A., Soloviev A.* Geo-complexity and earthquake prediction. In: R. Meyers (ed.) Encyclopedia of Complexity and Systems Science, New York: Springer, 2009. P. 4178–4194.

*Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M., Taylor P.* Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes // Tectonophysics 2007. V. 431. P. 211–220.

*Tronin A.A.* Satellite Remote Sensing in Seismology. A Review // Remote Sens. 2010. V. 2. № 1. P. 124–150.

Zlatopolsky A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Comput. Geosci. 1997. V. 23. № 1. P. 45–62.

Zlatopolsky A. Program LESSA (Lineament extraction and stripe statistical analysis) Automated linear image features analysis – experimental results // Comput. Geosci. 1992. V. 18. № 9. P. 1121–1126.

# Registering from Space Anomalous Variations of Baikal Rift Zone Lineament Systems during the M = 5.6 Earthquake Occurred on September 21, 2020

#### V. G. Bondur<sup>1</sup> and E. V. Gaponova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

Here we present the results of the study of lineament system anomalous variations during the preparation to the M = 5.6 earthquake that occurred on September 21, 2020 near the Baikal Lake 21 km from Kultuk settlement at a depth of 10 km. The method of the research is described here that is based on the automated lineament analysis of satellite imagery. The features of Baikal rift zone structure and its seismic activity have been analyzed. Schemes of stroke elongation lines, schemes of regional lineaments and their rose-diagrams have been built on the base of the processing of a series of satellite imagery obtained by Terra (MODIS) in the period between May 25 and October 6, 2020, as well as the total lengths of local lineaments and ratios of their lengths for various directions have been calculated. All this have allowed us to reveal anomalous variations of lineament systems 14 and 5 days before the earthquake of September 21, 2020. It is concluded that these anomalies belong to the geodynamic precursors of an earthquake.

*Keywords*: satellite imagery, remote sensing, earthquakes, seismic danger areas, geodynamics, lineaments, Baikal rift zone

#### REFERENCES

Aerokosmicheskiye metody geologicheskikh issledovaniy [Aerospace methods of geological research] / Chief ed. A.V. Pertsov. Saint Petersburg: VSEGEI Publ., 2000. 315 p. (In Russian).

*Akopian S.Ts., Bondur V.G., Rogozhin E.A.* Technology for monitoring and forecasting strong earthquakes in Russia with the use of the seismic entropy method // Izv., Phys. of the Solid Earth. 2017. V. 53. № 1. P. 32–51. DOI: 10.1134/S10693513170100 Aktualnyye voprosy sovremennoy geodinamiki Tsentralnoy Azii [Topical issues of modern geodynamics of Central Asia]. Novosibirsk: RAS Siberian Branch Publ, 2005. 297 p. (In Russian).

Analysis of the Block-Fault Structure Dynamics in the Area of Earthquakes in 2008 and 2020 on the Southern Lake Baikal By the Methods of Satellite Radiointerferometry // Doklady Earth Sciences. 2021. In Press.

Baykal: priroda i lyudi: entsiklopedicheskiy spravochnik [Baikal: nature and people: an encyclopedic reference book] / The Baikal Institute of Nature Management (Ed. by *Bondur V., Kuznetsova L.* Satellite Monitoring of Seismic Hazard Area Geodynamics Using the Method of Lineament Analysis // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 376–379.

Bondur V.G. Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2014. V. 50. № 9. P. 840–852. DOI: 10.1134/S0001433814090060

*Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Tubanov Ts.A., Dmitriev A.V., Dagurov P.N.* Analysis of the block-fault structure dynamics in the area of earthquakes in 2008 and 2020 on the southern Lake Baikal by the methods of satellite radiointerferometry // Doklady Earth Sciences. 2021. In Press.

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V., Steblov G.M., Shalimov S.L. Geomechanical Models and Ionospheric Variations Related to Strongest Earthquakes and Weak Influence of Atmospheric Pressure Gradients // Doklady Earth Sciences. 2007. V. 414. № 4. P. 666–669. DOI: 10.1134/S1028334X0704038.

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V. Connection between variations of the stressstrain state of the Earth's crust and seismic activity: the example of Southern California // Doklady Earth Sciences. 2010. V. 430. Part 1. P. 147–150.DOI: 10.1134/ S1028334X10010320

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Rodkin M.V. The Evolution of the Stress State in Southern California Based on the Geomechanical Model and Current Seismicity // Izv., Phys. Solid Earth. 2016. V. 52. № 1. P. 117–128. DOI:10.1134/S1069351316010043

Bondur V.G., Gokhberg M.B., Garagash I.A., Alekseev D.A. Revealing Short-Term Precursors of the Strong M > 7Earthquakes in Southern California From the Simulated Stress–Strain State Patterns Exploiting Geomechanical Model and Seismic Catalog Data // Frontiers in Earth Science. 2020. V. 8:571700. DOI: 10.3389/feart.2020.571700

*Bondur V.G., Krapivin V.F., Savinyh V.P.* Monitoring i prognozirovanie prirodnyh katastrof [Monitoring and forecasting of the natural disasters]. Moscow: Nauchnyy mir, 2009. 692 p. (In Russian).

*Bondur V.G., Smirnov V.M.* Method for Monitoring Seismically Hazardous Territories by Ionospheric Variations Recorded by Satellite Navigation Systems // Doklady Earth Sciences. 2005. V. 403. № 5. P. 736–740.

Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S. Sovmestnyy analiz anomaliy razlichnykh geofizicheskikh poley, registriruemykh iz kosmosa, pri podgotovke silnykh zemletryaseniy v Kalifornii [Joint Analysis of Geophysical Field Anomalies Registered from Space during Preparation of Strong Earthquakes in California] // Issledovanie Zemli iz Cosmosa. 2020. № 5. P. 3–24. (In Russian). DOI: 10.31857/S0205961420050036

Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S. Systematization of Ionospheric, Geodynamic, and Thermal Precursors of Strong ( $M \ge 6$ ) Earthquakes Detected from Space // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2018. V. 54. No 9. P. 1172–1185. DOI: 10.1134/S0001433818090475.

*Bondur V.G., Voronova O.S.* Variatsii ukhodyashchego dlinnovolnovogo izlucheniya pri podgotovke i protekanii sil'nykh zemletryaseniy na territorii Rossii v 2008 i 2009 godu [Outgoing longwave radiation variations during preparation and occurrence of strong earthquakes in Russia in 2008 and 2009] // Izvestiya vuzov. Geodeziya i Aerofotosemka. 2012. № 1. P. 79–85 (In Russian).

*Bondur V.G., Zverev A.T.* A Method of Earthquake Forecast Based on the Lineament Analysis of Satellite Images // Doklady Earth Sciences. 2005. V. 402. № 4. P. 561–567.

Bondur V.G., Zverev A.T. Kosmicheskiy metod prognoza zemletryaseniy na osnove analiza dinamiki sistem lineamentov [A method of earthquake forecast based on the lineament dynamic analysis using satellite imagery] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2005. № 3. P. 37–52 (In Russian).

Bondur V.G., Zverev A.T. Mekhanizmy formirovaniya lineamentov, registriruemyh na kosmicheskih izobrazheniyah pri monitoringe seysmoopasnyh territoriy [Lineament system formation mechanisms registered in space images during the monitoring of seismic danger areas] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2007. № 1. P. 47–56 (In Russian).

Bondur V.G., Zverev A.T., Gaponova E. Precursor Variability of Lineament Systems Detected Using Satellite Images during Strong Earthquakes // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2019. V. 55. № 9. P. 1283–1291.

Boykov A.M., Kornienko S.G. Proyavleniye seysmogeneriruyushchikh lineamentov Dagestana v dannykh kosmicheskoy teplovoy syomki: Teoriya i eksperiment [Manifestation of seismogenic lineaments of Dagestan in space thermal imagery data: Theory and experiment] // Proc. of the Institute of Geology of Dagestan Science Center of RAS. 2007. № 51. P. 68–76 (In Russian). DOI: https:// doi.org/10.1134/S0001433819090123

*Gaponova E.V., Zverev A.T., Tsidilina M.N.* Detection of Anomalies in Lineament Systems from Satellite Images during Strong (M = 6.4 and 7.1) Earthquakes in California // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2020. V. 56. No 9. P. 1062–1071. DOI: 10.1134/S000143382009011X.

*Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M.* Ispolzovaniye dannykh distantsionnogo zondirovaniya uchastkov zemnoy kory dlya analiza geodinamicheskoy obstanovki [The use of remote sensing data of areas of the earth's crust for the analysis of geodynamic conditions] // Moscow: GEOS, 2015. 112 p. (In Russian).

*Keilis-Borok V., Gabrielov A., Soloviev A.* Geo-complexity and earthquake prediction. In: R. Meyers (ed.) Encyclopedia of Complexity and Systems Science, New York: Springer, 2009. P. 4178–4194.

*Kissin I.G.* On the System Approach in the Problem of Forecasting the Earthquakes // Izv., Phys. Solid Earth. 2013. V. 49.  $\mathbb{N}_{2}$  4. P. 587–600. DOI: 10.1134/S1069351313040058.

*Korchuganova N.I., Korsakov A.K.* Distantsionnyye metody geologicheskogo kartirovaniya: uchebnik [Remote methods of geological mapping: textbook]. Moscow: KDU Publ., 2009. 288 p. (In Russian).

*Lunina O.V., Gladkov A.S., Sherman S.I.* Variations of stress fields in the Tunka rift of the southwestern Baikal region // Geotectonics. 2007. V. 41. № 3. P. 231–256.

*Mats V.D., Granina L.Z., Yefimova I.M.* Evolyutsiya kontinental'nogo rifta: ot prosto vpadiny do slozhnoy struktury okeanicheskogo dna [The evolution of the continental rift: from simple troughs to complex structures of the ocean floor] // Priroda. 2014. № 2. P. 28–38 (In Russian).

*Mogi K.* Earthquake Prediction. Tokyo: Academic Press, 1985. 355 p.

*Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M., Taylor P.* Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes // Tectonophysics 2007. V. 431. P. 211–220.

Pulinets S.A., Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova M.V. Verification of the concept of seismoionospheric coupling under quiet heliogeomagnetic conditions, using the Wenchuan (China) earthquake of May 12, 2008, as an example // Geomagnetism and Aeronomy. 2010. V. 50. № 2. P. 231– 242. DOI: 10.1134/S0016793210020118

*Sobolev G.A., Ponomarev A.V.* Fizika zemletryaseniy i predvestniki [Earthquake physics and precursors]. Moscow: Nauka, 2003. 270 p. (In Russian).

*Tronin A.A.* Satellite Remote Sensing in Seismology. A Review // Remote Sens., 2010. V. 2. № 1. P. 124–150.

Vilor N.V., Adrulaytis L.D., Zarubina O.V., Danilov B.S. Geokhimiya seysmoaktivnykh regional'nykh razlomov

(Baykal'skaya riftovaya zona, Vostochnaya Sibir) [Geochemistry of seismically active regional faults (Baikal rift zone, Eastern Siberia)] // Geokhimiya. 2015. № 1. P. 64– 82 (In Russian).

Zlatopolskiy A.A. Metodika izmereniya oriyentatsionnykh kharakteristik dannykh distantsionnogo zondirovaniya (tekhnologiya LESSA) [Technique for measuring orientation characteristics of remote sensing data (LESSA technology)] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2008. Iss. 5. V. 1. P. 102–112 (In Russian).

Zlatopolsky A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Comput. Geosci. 1997. V. 23. № 1. P. 45–62.

Zlatopolsky A. Program LESSA (Lineament extraction and stripe statistical analysis) Automated linear image features analysis – experimental results // Comput. Geosci. 1992. V. 18. № 9. P. 1121–1126.

## \_\_\_\_\_ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ \_\_\_\_\_ Космической информации

## МНОГОМОДЕЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ДИНАМИКИ ФИТОМАССЫ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ ТУНДРЫ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

© 2021 г. В. В. Михайлов<sup>*a*, \*</sup>, А. В. Спесивцев<sup>*a*</sup>, В. А. Соболевский<sup>*a*</sup>, Н. К. Карташев<sup>*a*</sup>, И. А. Лавриненко<sup>*b*</sup>, О. В. Лавриненко<sup>*b*</sup>, В. А. Спесивцев<sup>*a*</sup>

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия <sup>b</sup>Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия \*E-mail: mwwcari@gmail.com Поступила в редакцию 12.07.2020 г.

В работе представлена двухэтапная методика решения задачи прогнозирования фитомассы и соответствующая ей двухкомпонентная модель динамики фитомассы. На первом этапе решения применен полимодельный подход к выбору и построению прогностической модели динамики NDVI. Использована классическая регрессионная технология, а также когнитивные методы моделирования, ориентированные на решение слабоформализованных задач — технология искусственных нейронных сетей и нечетко-возможностный подход. На втором этапе выполнен переход от безразмерных показателей NDVI к метрическим величинам хлорофиллового индекса. По хлорофилловому индексу оценивается масса автотрофных органов растений и определяется фитомасса сообщества с учетом особенностей ее накопления и распределения в растениях. Разработка и верификация модели выполнена по данным об NDVI и запасах фитомассы растительных сообществ о. Колгуев. По результатам моделирования запас зеленой фитомассы моделируемого сообщества находится в диапазоне от 215 до 242 г/м<sup>2</sup>, что по порядку величин сопоставимо с фактическими оценками — 180— 235 г/м<sup>2</sup>. Выполнен сравнительный анализ методов моделирования.

*Ключевые слова*: полимодельный подход, фитомасса, NDVI, хлорофилловый индекс, регрессия, искусственная нейронная сеть, нечетко-возможностная модель

DOI: 10.31857/S0205961421020056

#### введение

Проблема оценивания запасов надземной фитомассы растительных сообществ разных природно-климатических зон и прогнозирование их изменений в зависимости от факторов среды является важной и актуальной задачей. Знания о запасах фитомассы позволяют оценить кормовую емкость пастбищ и рассчитать предельную численность домашних или диких животных для длительного устойчивого природопользования. С научных позиций информация о фитомассе важна для исследования круговоротов биогенных элементов и установления границ природно-климатических зон в условиях происходяшего потепления Арктики. Прогнозирование позволяет оценить величину запасов фитомассы и смещение границ природных зон в перспективе в условиях изменяющегося климата. При решении подобных задач естественно возникает проблема создания моделей, эффективность и полезность которых во многом зависит от применяемых математических методов их построения. Следует также учитывать достоверность, точность, объективность, нечеткость, однородность, объем и другие характеристики анализируемой информации.

С точки зрения математики задачи подобного рода относятся к сложным и слабоформализованным. При этом сложность определяется не только количеством элементов и связей между ними в системе, это лишь один из многих присущих ей факторов. Выделяют два типа сложности – вычислительную и когнитивную. Вычислительная сложность порождает необходимость разработки новых подходов и методов оценивания и прогнозирования состояния конкретных сложных объектов, функционирующих, как правило, в условиях существенной неопределенности и недостатка информации. Когнитивный тип сложности обусловлен устройством наблюдателя (мозг), а не наблюдаемого объекта. Когнитивная составляющая сложности как важнейшая характеристика "нелинейности" интерпретируется в том смысле, что мозг успешно справляется только с теми сложностями, алгоритмы обработки которых человек приобрел в ходе своей эволюции, например при распознавании образов. На практике, как следует из многочисленных публикаций, этот тип сложности заключается в умении исследователя правильно ставить задачи с методологической и математической точек зрения.

Решаемая в данном исследовании задача определена как слабоформализованная. Такая формулировка связана с тем, что для природных, общественных и техносферных систем характерны (Моисеев, 1981):

- взаимозависимость свойств и организации;

 – бесперспективность применения линейных аппроксимаций;

стохастизирующий фактор;

 невыводимость свойств системы как целого из свойств ее элементов;

 невоспроизводимость поведения по начальным данным;

 неопределимость и логическая недоказуемость законов причинности;

- самоподобие;

- саморазвитие.

Оценивание динамики фитомассы растительных сообществ тундры обладает всеми перечисленными особенностями с присущими внутренней неопределенностью, эмпирическим отбором факторов, ошибками их определения, неполнотой учитываемых внешних возмущающих воздействий, наличием локальных микроклиматических и почвенных условий произрастания сообществ и многих других причин. Таким образом, можно констатировать, что для такого слабоформализованного природного объекта построить адекватную модель методами детерминированной математики невозможно.

Исходными данными для разработки прогнозных моделей являются сведения о сезонной и межгодовой динамике фитомассы видов и сообществ растительного покрова. Получение такой информации традиционными наземными методами связано с проведением дорогостоящих многолетних стационарных исследований (Андреев и др., 1978). Особенно сложно проводить такие работы в обширных, малонаселенных и труднодоступных районах Крайнего Севера. Современные подходы основываются на использовании спутниковых радарных (Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, б; Бондур и др., 2019), а также оптических мультизональных снимков земной поверхности, и применении методов обработки этих снимков (Бондур, 2014; Бондур, Старченков, 2001) для определения с их помощью различного рода показателей, характеризующих свойства растительного покрова (Бондур, 2014; Бондур, Воробьев,

2015; Воронин, 2006; Лавриненко, 2013; Лавриненко, Лавриненко, 2013; Анисимов и др., 2015; Иванова, 2020; Walker et al., 2003; Reynolds et al., 2012; Karlsen et al., 2019).

Для оценивания сезонной и межгодовой динамики продуктивности растительных сообществ часто используются различные вегетационные индексы, такие как: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), улучшенный вегетационный индекс EVI (Enhanced Vegetation Index) и LAI (Leaf Area Index) – листовой индекс (Бондур, Воробьев, 2015; Шевырногов др., 2018). В большинстве случаев в качестве такого показателя используется NDVI – вегетационный индекс, характеризующий интенсивность фотосинтеза.

В работе (Бондур, Воробьев, 2015) исследовалось изменение различных вегетационных индексов для анализа угнетенной растительности в импактных арктических районах. В работе (Reynolds et al., 2012) исследованы изменения NDVI и фитомассы на трансектах в пределах разных подзон тундры Аляски и Западной Сибири. Построены экспоненциальные зависимости, описывающие эти изменения для растительных сообществ, которые в наибольшей степени отвечают усредненным климатическим и почвенным условиям соответствующей природно-климатической подзоны на трансектах. Эти исследования, однако, не касались интразональных сообществ и временной (в том числе межгодовой) динамики процессов.

В отличие от величин отраженной радиации, NDVI, как и другие приведенные выше индексы, являются нормированными, безразмерными показателями, связанными с надземной зеленой фитомассой не материальными потоками энергии или вещества, а информационно, с оценкой связи корреляционными показателями.

Для определения прироста органического вещества в посевах И.А. Тарчевским (1977) предложен хлорофилловый индекс ХИ, выражаемый в граммах хлорофилла на квадратный метр. В отличие от NDVI, XИ – размерный индекс, который определяет интенсивность потоков фотосинтетически связанного углерода в зависимости от количества пигментов в растении. Величина ХИ может быть рассчитана на основе данных наземных измерений содержания хлорофилла в автотрофных органах растений и данных о массе этих органов. Первоначально индекс был введен для оценки продуктивности одноярусных сельскохозяйственных культур. Успешным оказалось применение ХИ для лесных древостоев (Целникер, Малкина, 1994; Воронин, 2015), где обнаружена практически линейная зависимость между годичной аккумуляцией углерода и величиной ХИ. В работе В.В. Елсакова и В.М. Шанова (2019) сделана попытка применения хлорофиллового индекса для оценки надземной фитомассы растительных сообществ тундры.

Как хлорофилловый, так и вегетационный индекс (NDVI) характеризуют один и тот же показатель растительного сообщества – интенсивность процесса фотосинтеза на определенном этапе сезонного развития растений сообщества в условиях среды, соответствующих времени проведения измерений. Применение ХИ предпочтительнее, поскольку по этому индексу непосредственно может быть оценена надземная фитомасса с учетом известных морфофизиологических соотношений. Однако по NDVI имеются обширные статистические материалы, полученные по спутниковым снимкам для разных территорий, условий произрастания растений и времени вегетации, которые могут быть использованы при исследовании и моделировании процессов вегетации. Для хлорофиллового индекса такой информации нет и получить ее не представляется возможным ввиду высокой стоимости наземных работ. По этой причине совместное использование указанных индексов для оценивания и прогнозирования состояния растительности представляется крайне полезным и продуктивным.

С позиций моделирования преимущества двухкомпонентной модели в том, что ее составляющие — прогностическая модель определения NDVI и метрическая модель оценивания фитомассы сообществ — могут разрабатываться и настраиваться независимо на основе собственных массивов данных. Связывание компонент и переход от NDVI к XИ выполняется с использованием соответствующих пересчетных формул. При этом корректировка формул не требует перенастройки компонент. Для тундровых малоярусных сообществ выведена линейная взаимосвязь межу XИ и NDVI (Елсаков, 2013).

Цель данной работы состояла в построении компьютерной модели для прогнозирования запасов надземной фитомассы (максимальной величины фитомассы в период вегетации) растительного сообщества тундры как сложной слабоформализованной системы в зависимости от погодно-климатических условий. При этом использован прием перевода статистически слабо представленного материала наземных наблюдений в область более точных и статистически достоверных по объему данных космических снимков одного и того же района исследований.

Разработка модели выполнена по материалам о растительных сообществах о. Колгуев. Для верификации модели использовались архивные данные об NDVI, результаты наземных измерений фитомассы, а также обобщенные данные о связи NDVI с фитомассой для биома тундры (Reynolds et al., 2012). Использование NDVI как промежуточного параметра связано с невозможностью построения прямой связи между ними изза объективной невыполнимости условий для организации репрезентативной выборки как по объему, так и однородности наземных исследований.

Рассмотрены три независимых полхода к решению данной задачи: классическая регрессионная технология, технология искусственных нейронных сетей и нечетко-возможностный подход. Первые два подхода основаны на использовании статистических данных о функционировании объекта молелирования и состоянии факторов срелы. а нечетко-возможностный подход базируется на знаниях и опыте экспертов (Спесивцев и др., 2010). С учетом особенностей информационного обеспечения исходной задачи, в качестве независимой переменной взят безразмерный вегетационный индекс (NDVI). Метризация результатов осуществлена путем перехода от NDVI к хлорофилловому индексу. По хлорофилловому индексу оценивается масса автотрофных органов растений. Для перехода к надземной фитомассе сообщества учитывается также масса одревесневевших частей кустарников и кустарничков.

## ОБЪЕКТ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве конкретного объекта для моделирования межгодовой динамики запасов фитомассы выбран арктический о. Колгуев – (подзона типичных тундр), расположенный в Баренцевом море.

На острове в 2005-2013 гг. проводились геоботанические исследования (Лавриненко, 2013; Лавриненко, Лавриненко, 2013, 2018). Накоплен обширный материал по картированию зональных и интразональных растительных сообществ с их геоботаническим описанием на плошалках. спектральными характеристиками и точной географической привязкой. Для учета надземной фитомассы основных типов сообществ, общей и по основным жизненным формам применяли методику, предложенную В.Д. Александровой и В.Ф. Шамуриным (1972). На участках размерами 5 на 5 м для тундровых (кустарничково-моховых, кустарничковолишайниковых) сообществ и 10 на 10 м для кустарников (ивняки, ерники) выполняли геоботанические описания, определяли пространственную структуру сообщества, характеризовали микрорельеф. Для определения количества надземной фитомассы в пределах участков закладывали площадки 1 м<sup>2</sup>, включающие все имеющиеся элементы микрорельефа. В пределах этих площадок проводили отбор надземной фитомассы

На территории острова расположены две метеостанции – Колгуев-Северный и Бугрино. Для построения моделей были выбраны широко рас-

18

Год		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
NDVI	Y	0.6246	0.6100	0.5950	0.6219	0.5879	0.7000	0.7142	0.5841	0.6820	0.6774	0.7144
Сумма положительных температур, °С	<i>X</i> <sub>1</sub>	757	666	667	850	1075	1142	1153	818	1053	1449	983
Средняя скорость ветра, м/с	<i>X</i> <sub>2</sub>	7.4	7.6	6.2	5.1	5	5.6	5.2	5	5.2	5	5.8
Средняя величина облачности, баллы	<i>X</i> <sub>3</sub>	8.5	8	7.5	8.5	7.8	8.3	7	8.4	8.2	8	8.3
Сумма осадков, мм/м <sup>2</sup>	$X_4$	281	245	203	235	168	221	74.5	74	108	61.6	32
Время начала вегетации, дни	<i>X</i> <sub>5</sub>	43	35	31	29	23	15	23	17	2	15	33
Длительность вегетационного периода, дни	<i>X</i> <sub>6</sub>	141	149	153	154	162	163	140	144	177	168	159

Таблица 1. Исходные данные

пространенные на плакорных местообитаниях зональные для типичных тундр редкоивовые осоково-кустарничково-моховые сообщества. Последние преобладают на водоразделах в условиях морской аккумулятивной равнины на террасах с высотами 30–50 и 50–80 м. Отдельные холмы, на поверхность которых выходят суглинки с галькой и валунами, достигают 150–170 м. Кустарниковый тип растительности представлен исключительно ивняками, которые встречаются, главным образом, на склонах и в понижениях рельефа. Подчиненное место занимает луговой тип растительности, который также покрывает многочисленные склоны.

Для оценивания межгодовой динамики NDVI были отобраны снимки с космических аппаратов Landsat (5, 7, 8) с максимальной величиной этого индекса. Для этого выполнен анализ доступного архива данных Landsat за период времени с 1985 по 2017 гг. и выбраны данные, полученные в период с начала третьей декады июля до конца первой декады августа. Было отобрано 46 безоблачных снимков, около 60% из которых сделаны в интервале времени с 3 декады июля по 1 декаду августа, а остальные – для более ранних или поздних сроков ввиду сдвигов пика вегетации, в отдельных случаях - ввиду отсутствия более качественных данных из-за облачности. Для каждого срока определялось среднее значение NDVI по данным для 12 участков территории с данным типом растительности. Ряд средних значений индекса включался в состав исходных данных для построения модели (табл. 1).

Для обработки и анализа использован продукт Landsat Surface Reflectance-derived NDVI [Landsat Normalized Difference Vegetation Index], который относится к числу Landsat Level-2 Surface Reflectance products, разработанных U.S. Geological Survey (USGS) и находящихся в открытом доступе [ESPA]. Получение значений NDVI для выбранных участков растительных сообществ выполнено средствами открытого программного обеспечения QGIS.

Вследствие различия сенсоров космических аппаратов Landsat 5, 7 и 8, значения стандартных продуктов NDVI, полученные на одни и те же участки, но по данным с разных спутников, могут отличаться (Liet al., 2014). Уточнение и корректировка этих данных требовала специальной проверки и использования большего количества данных и тестовых участков, что не входило в задачи наших исследований, которые носят научно-методический характер.

В состав аргументов модели включены предикторы годовой динамики фитомассы по литературным данным (Bhatt et al., 2018; Зуев и др., 2019; Матвеева, 1998) — сумма положительных температур и сумма осадков, и дополнительные факторы, полученные на основе данных метеостанций – средняя величина облачности, средняя скорость ветра, длительность вегетационного периода и время начала вегетации, отсчитываемое с 1 мая. Использованы два варианта задания интервала осреднения и суммирования данных. Первый вариант – от начала вегетации до момента определения NDVI, второй - от начала до окончания вегетации. Значения аргументов рассчитывались на основе данных с метеостанций на острове. Фрагмент данных для построения моделей динамики фитомассы представлен в табл. 1.

В работе (Андреев и др., 1978) отмечено, что одним из важнейших факторов, определяющих рост и развитие растений, является температура почвы. Однако отсутствие объективных данных не позволило включить этот параметр непосредственно в состав аргументов модели. Косвенно температура верхнего слоя почвы учитывается в модели ввиду ее связи с суммой положительных температур воздуха.



**Рис. 1.** Корреляционные поля точек: a – по выборке за 16 лет (R = 0.82),  $\delta$  – по тестовой выборке за 8 лет (R = 0.67).

#### ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИКИ NDVI

Разработка модели динамики NDVI выполнялась с использованием трех независимых подходов. В первом подходе модель представлена в форме уравнения регрессии, во втором — в форме искусственной нейронной сети, в третьем — модель задается в виде полинома, построенного на основе нечетко-возможностной методологии моделирования.

Метод 1. Моделирование на основе уравнений линейной регрессии. Расчеты выполнялись с использованием стандартного пакета программ SCILAB.

Исходную выборку значений NDVI, фрагмент которой приведен в табл. 1, объемом данных за 24 года. разделили на две: по 16 значениям строили линейную регрессию из 6 выбранных переменных, а 8 точек, отобранных случайным образом из исходной выборки, использовали для проверки адекватности модели. Сравнение вариантов расчетов, полученных при различных вариантах осреднения входных данных, показало, что наименьшая ошибка получается на данных, усредненных по всему интервалу вегетации. Уравнение регрессии в этом случае имеет вид:

$$Y = 0.8341 + 0.0002X_1 + 0.0338X_2 - - 0.0601X_3 - 0.0002X_4 + 0.0007X_5 - 0.0003X_6.$$
 (1)

Оценку адекватности уравнения регрессии (1) проведем по двум наглядным критериям корреляционных полей точек (рис. 1), где теоретической линией регрессии служит биссектриса прямого угла. В первом случае сравниваются расчетные зна-

чения по модели (1) (ось *Y*) с фактическими данными (ось *X*) по исходной выборке за 16 лет (рис. 1, *a*), во втором — сравниваются данные тестовой выборки за 8 лет (рис. 1,  $\delta$ ).

На исходной совокупности величина среднеквадратической ошибки — 6.1%, на контрольной выборке — 9.8%. Кроме того, наблюдается систематическое отклонение линии регрессии (рис.  $1, \delta$ ) от теоретической.

Метод 2. Моделирование на основе технологии искусственных нейронных сетей (ИНС).

Технология ИНС широко используется в настоящее время для решения задач классификашии и картирования растительного покрова, распознавания типов растительных сообществ по космическим снимкам (Бондур, 2014; Pouliot et al., 2019; Chang et al., 2019). При этом структура нейронных сетей такова, что, несмотря на их универсальность и масштабируемость, для каждого нового объекта их требуется либо дообучать, либо обучать заново в зависимости от архитектуры, даже если объекты принадлежат к одному классу. Это происходит из-за того, что в новых объектах на выходные параметры могут сильно влиять зависимости, которые в остальных случаях либо проявляются слабо, либо не проявляются вовсе, и ИНС, обученная на данных, где эта зависимость малозначима, не сможет адекватно описывать новый объект.

В нашей работе технология ИНС была применена для моделирования взаимосвязи NDVI растительного сообщества с факторами среды. Для создания ИНС была использована система автоматического подбора конфигурационных параметров числовых характеристик архитектуры и



**Рис. 2.** Корреляционные поля точек: a – по обучающей выборке за 16 лет (R = 0.85),  $\delta$  – по тестовой выборке за 8 лет (R = 0.81).

параметров процесса обучения. В качестве основы была использована классическая архитектура искусственной нейронной сети — многослойный персептрон Румельхарта (частный случай многослойного персептрона Розенблатта).

Система реализована на базе генетического алгоритма (ГА), где в качестве "особей" выступали простые персептроны Румельхарта. Оценка точности ИНС проводилась по среднеквадратическому отклонению рассчитанных на сети и полученных по спутниковым данным значений NDVI. Обучающая и тестовая выборка определялись случайным образом на каждой итерации ГА. Для создания ИНС использовался язык программирования Руthon и библиотеки Keras и Tensor-Flow, применяемые для моделирования нейросетевых процессов.

Обучение происходило на 1000 эпохах, в качестве regression loss functions применялась функция logcosh (logarithm of the hyperbolic cosine of the prediction error), в качестве optimizer использовалась функция adam (adaptive moment estimation).

В состав вариантов обучения входило: обучение по полному набору аргументов (табл. 1) для всего сезона вегетации и для укороченного интервала (от начала вегетации до момента определения NDVI); обучение по расширенному набору с добавлением в состав аргументов значения NDVI предыдущего года; обучение по ограниченному набору с удалением одного из аргументов. Для каждого варианта обучения производился полный цикл обучения и формировались отдельные ИНС, которые впоследствии сравнивались между собой. Сравнение ИНС выполнялось по нормированной величине среднеквадратического отклонения рассчитанных на сети и полученных по спутниковым данным значений NDVI.

Результаты сравнения показали, что наивысшей точностью обладает сеть, обученная на полном наборе аргументов. Именно эта сеть была принята в качестве модели динамики NDVI. Выбранная сеть имела следующую конфигурацию. Входной слой сети состоит из 6 нейронов, соответствующих входному вектору. Скрытый слой был создан один и состоял из 19 нейронов. Функцией активации для скрытых слоев была linear. Выходной слой состоял из 3 нейронов с функцией активации selu (scaled exponential linear units).

Поскольку ИНС сложно представить аналитически, оценку адекватности моделирования также будем проводить по корреляционным полям (рис. 2). На рис. 2,  $\delta$  так же, как и для линейной регрессии (рис. 1,  $\delta$ ), отчетливо просматривается систематическая погрешность, причину которой можно объяснить малыми объемами как обучающей, так и тестовой выборок.

Метод 3. Моделирование на основе нечетковозможностного подхода.

Принципиальное отличие нечетко-возможностного подхода состоит в том, что модель строится не на данных, а на знаниях и опыте экспертов (Спесивцев и др., 2010; Игнатьев и др., 2018, Бондур, 2000). Эксперт является "интеллектуальной информационно-диагностической системой", знания которой используются для создания модели изучаемого явления (Спесивцев и др., 2010). Поскольку модель создается на знаниях и опыте эксперта, то любые статистические данные по теме исследования образуют независи-

	Температура.	Облачность	Начало	Ллит вегет	NDVI <i>Y</i> экспертные оценки рассчита		
N⁰	°C	баллы	вегетации, дни	периода, дни			рассчитанные
					Dep Golti III Ie	числовые	на модели (2)
	$x_1$	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>x</i> <sub>3</sub>	<i>x</i> <sub>4</sub>	вероальные	Y	<i>Y</i> <sub>2</sub>
1	-1	-1	-1	-1	HC	0.5750	0.5750
2	1	-1	-1	-1	C-BC	0.6875	0.7063
3	-1	1	-1	-1	H-HC	0.5375	0.5281
14	1	-1	1	1	BC-B	0.7625	0.7531
15	-1	1	1	1	HC	0.5750	0.5750
16	1	1	1	1	C-BC	0.6875	0.7063

Таблица 2. Фрагмент опросной матрицы с экспертными оценками и расчетными значениями по модели

мую проверочную выборку, которая может использоваться для оценки адекватности модели (и знаний эксперта) реальному объекту и выявления причин возникших ошибок.

Методика построения нечетко-возможностных моделей (Спесивцев и др., 2010; Игнатьев и др., 2018; Бондур, 2000) предусматривает выбор и обоснование экспертом факторного пространства, в котором решается задача. Так, в случае оценивания динамики фитомассы в тундровой зоне в качестве факторного пространства эксперт из общего числа шести переменных (табл. 1) выбрал четыре наиболее информативных, по его мнению, которые использованы в табл. 2. При этом все переменные представлялись как лингвистические в виде рис. 3, где приведена зависимая переменная *Y*.

Независимые переменные, согласно правилам теории планирования экспериментов, представлялись в кодированном (стандартизованном) виде в интервале [-1, +1]. Мнения эксперта по задаваемым ситуациям табулируются в опросной матрице (табл. 2), где каждая строка представляет собой нечеткое продукционное правило импликативного типа "если..., то...".

В табл. 2 представлен фрагмент опросной матрицы, в которой приведены экспертные оценки *У* в вербальном и числовом виде по шкале рис. 3, где обозначены моды оценок NDVI:

Н – низкое значение индекса, HC – ниже средней, C – среднее, BC – выше средней, В – высокое.

Концы оппозиционной стандартизованной шкалы по каждой независимой переменной обозначают "-1" – наименьшее значение, "+1" – наибольшее значение признака, как отражено в табл. 2. Таким образом, вопросы эксперту задаются по четко заданному плану (в данном случае это полный факторный эксперимент типа 2<sup>4</sup>) в вершинах гиперкуба.

Следующим шагом реализации методики (Спесивцев и др., 2010; Игнатьев и др., 2018) является построение по данным табл. 2 полиномиальной модели. Результирующее выражение для полиномиальной модели со значимыми коэффициентами имело вид:



Рис. 3. Укак лингвистическая переменная.



Рис. 4. Проверка гипотезы адекватности расчетов мнению эксперта (a) и фактическим значениям NDVI (б).

$$Y = 0.5617 + 0.068x_1 + 0.0117x_2 + 0.0258x_3 + + 0.0352x_4 + 0.0211x_1x_2 - 0.117x_1x_4 - - 0.0117x_2x_3 + 0.0164x_1x_2x_3,$$
(2)

где все независимые переменные представлены в стандартизованном масштабе.

Результаты проверки степени адекватности расчетов по модели (2) экспертным оценкам NDVI показаны на рис. 4, *a*, а изучаемому явлению – на рис. 4, *б*.

Как следует из анализа рис. 4, результаты моделирования почти полностью совпадают с оценками экспертов о величине NDVI (коэффициент корреляции R = 0.98). Таким образом, модель (2) достаточно хорошо описывает представления экспертов о зависимости NDVI от прогнозных значений факторов. Степень адекватности расчетов на модели (2) относительно фактических значений NDVI (рис. 4, б) слабее (R = 0.79). Это может быть связано с особенностями отбора факторов и их градациями, различием микроклиматических и почвенных условий произрастания на участках, ошибками оценок индекса NDVI и временными сдвигами съемок, а также и другими причинами, присущими сложным слабоформализованным явлениям.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ NDVI

Сравнение различных подходов к моделированию динамики NDVI показано на рис. 5. Как следует из анализа рисунка, результаты расчетов индекса на основе моделей разных типов достаточно близки и, несмотря на относительно небольшой объем исходных данных, отражают основные тенденции изменения величины NDVI. Построенные модели и проведенные по ним расчеты (рис. 5) позволяют провести качественный анализ их возможностей и оценить применимость использованных методов для изучения слабоформализованных систем, к которым относится исследуемая проблема прогнозирования NDVI в зависимости от факторов среды.

1. Множественная линейная регрессия выбрана в качестве примера для оценки возможности использования метода обработки данных пассивного эксперимента для моделирования слабоформализованной биологической системы. Известно, что биологические системы, как правило, нелинейны в отношении их реакции на воздействие внешних факторов. Регрессионная модель — это крайне упрощенный линеаризованный образ реальной системы, тем более слабоформализованной. Кроме того, независимые переменные, как правило, обладают нежелательсвойством мультиколлинеарности, ным что приводит к ошибкам в вычислении коэффициентов при неизвестных. Как следствие, на рис. 1, б отчетливо просматривается систематическая погрешность, причину которой можно объяснить, например, взаимосвязями между независимыми переменными и малым объемом выборки. Таким образом, применять регрессионные методы для анализа сложных биологических систем следует с большой осторожностью.

2. В процессе работы с ИНС была определена конфигурация сети, обеспечивающая наибольшую точность целевых параметров. Результаты экспериментов показали, что ошибка оценива-



**Рис. 5.** Графики фактических и рассчитанных по моделям значений межгодовой динамики NDVI. Кривая NDVI – фактические значения индекса; кривая ИНС – модель, построеная по технологии искусственных нейронных сетей; кривая НВП – модель, построенная на основе нечеткостно-возможностного подхода; кривая Регрессия – линейная регрессионная модель.

ния NDVI по ИНС, обученной по данным, усредненным для сезона вегетации, составляет около 5%. Результаты тестирования ИНС по величине ошибки оказались выше ожидаемых для исходных рядов данных длиной 25 лет, поскольку считается (Hastie et al., 2013), что такой объем информации может оказаться недостаточным для эффективного обучения ИНС. При обучении ИНС по укороченному ряду данных ошибка оценивания возрастает почти в 1.5 раза. Учет предыстории путем включения в состав аргументов NDVI предыдущего года почти не влияет на величину ошибки.

Эксперименты с обучением на ограниченных выборках проводились для оценки влияния факторов на адекватность модели. Результаты показали, что наибольшую роль в изменениях NDVI играет сумма температур. При исключении этого фактора ошибка увеличивается с 5 до 8.3%. Затем идет сумма осадков – увеличение ошибки до 7.6%, период вегетации и время начала вегетации – увеличение ошибки до 6.6%. При исключении ветра и облачности из состава обучающей выборки ошибка не увеличивается, что можно объяснить слабой межгодовой изменчивостью этих факторов. Такое распределение факторов соответствует ранжированию их значимости по литературным данным (Bhatt et al., 2018; Зуев и др., 2019), но от-

личается от набора, выбранного экспертом при построении нечетко-возможностной модели.

Таким образом, тестирование технологии искусственных нейронных сетей на данной задаче подтвердило принципиальную возможность их применения для решения слабоформализованных задач. Но, поскольку технология ИНС относится к обучаемым моделям, точность результатов прогнозирования целиком зависит от размера и релевантности обучающей выборки. Также, поскольку ИНС имеют характер "черного ящика", зачастую крайне сложно проверить ее корректность на всем диапазоне входных данных. Вследствие этого нельзя с полной уверенностью говорить о корректности модели на данных, которые отсутствовали в обучающей и тестовой выборках.

3. Нечетко-возможностная модель. Анализируя различия между фактическими и расчетными значениями NDVI по нечетко-возможностной модели, построенной на опыте и знаниях эксперта (рис. 4 и 5), можно сделать следующие выводы:

 начиная с 2013 г. фактические значения NDVI резко возросли;

 – резкое увеличение значений ошибок в одну сторону свидетельствует о проявлении систематического воздействия от неучтенных ранее причин; – в качестве наиболее вероятной причины можно полагать после 2013 г. изменения в системе аппаратурной фиксации значений NDVI, о которых упоминалось выше. Именно с 2013 г. информация стала поступать с аппарата Landsat-8.

Следует отметить, что методы построения и уравнения регрессии и синтеза модели на основе ИНС не смогли выявить наличие систематической ошибки в принципе, поскольку исходные данные предполагаются, как минимум, однородными. В данном же случае, когда произошла замена космического аппарата как источника информации, данные до 2013 г. и после считать однородными нельзя.

Таким образом, нечетко-возможностная модель как отражение явных и неявных знаний эксперта продемонстрировала возможность, с одной стороны, избежать систематических погрешностей (рис. 4,  $\delta$ ) и провести более глубокий анализ однородности исходного фактического материала, а с другой — избежать применения некорректной интерпретации результатов детерминированных методов на неоднородных данных и получать дополнительно качественно новую информацию об изучаемом явлении.

#### ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МЕТРИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ФИТОМАССЫ

При разработке метрической компоненты использованы следующие биологические представления и результаты. Как отмечалось выше, хлорофилловый (ХИ) и вегетационный индекс (NDVI) характеризуют один и тот же показатель растительного сообщества — интенсивность процесса фотосинтеза. Высокая корреляция между индексами позволяет использовать дистанционные методы для оценки ХИ (Целникер, Малкина, 1998, Воронин, 2010). Для тундровых малоярусных сообществ выведена линейная взаимосвязь межу ХИ и NDVI (Елсаков, 2013):

$$XH = A1 \times NDVI - A2, \tag{3}$$

где коэффициенты: A1 = 2.40 г Хл/м<sup>2</sup>, A2 = 0.51 г Хл/м<sup>2</sup>, г Хл – граммы хлорофилла.

Для многовидовых мозаичных тундровых растительных сообществ XИ соответствует сумме величин индексов основных жизненных форм растений сообщества:

$$\mathbf{X}\mathbf{M} = \sum_{i}^{n} Pi \times Ci,\tag{4}$$

где Pi — количество автотрофной фитомассы растения, i — группы в сообществе г  $Pi/M^2$ , Ci — средняя концентрация хлорофилла в автотрофных органах i — группы г Хл/г Pi.

Величина *Ci* — специфична и, как показано в работе (Воронина, 2006), весьма консервативна и может быть определена заранее с помощью специально поставленных исследований. В работе (Головко и др., 2010) приведены значения данного показателя для основных видов растений природной флоры европейского Севера. Таким образом, изменение хлорофиллового индекса связано почти полностью с ростом или отмиранием гетеротрофных тканей в *Pi*.

Сезонные изменения ХИ связаны с ростом автотрофной фитомассы (листьев и однолетних зеленых побегов) и последующим старением и отмиранием листвы. Прирост автотрофной фитомассы и массы растения в целом определяется пролукцией фотосинтеза. Интенсивность фотосинтеза, в свою очередь, зависит от возраста листьев, освещенности, температуры воздуха, водного режима растений и минерального питания. Температурный оптимум снижается при уменьшении освещенности, что позволяет растениям тундры поддерживать достаточно высокую интенсивность фотосинтеза в течение всего полярного дня (Медведев, 2006). Для растений тундровой зоны характерен малый расход воды на транспирацию ввиду относительно небольшого прироста и преобладания подземной массы над надземной. При пониженных почвенных температурах в начале вегетации лимитирующим фактором служит недостаток элементов минерального питания (Андреев и др., 1978).

Исследования, выполненные на Западном Таймыре (Герасименко и др., 1980), показали, что отсутствуют существенные различия интенсивности фотосинтеза от фенологической фазы развития растений, а изменения интенсивности фотосинтеза в процессе вегетации в естественных условиях определяются главным образом колебаниями внешних факторов. Максимальные интенсивности фотосинтеза отмечены в средне-летний подсезон (вторая фаза – начало третьей декады июля – фаза цветения для большинства растений), во вторую декаду июля отмечена наивысшая скорость ростовых процессов и накопления фитомассы. На последующих фазах сезонного развития растений в результате ухудшения условий и старения листового аппарата происходит резкое снижение интенсивности фотосинтеза.

Общая тенденция изменения растительного покрова биома тундры на увеличение температуры воздуха, связанного с глобальным потеплением климата, заключается в росте надземной фитомассы, что отражается в увеличении NDVI. Согласно Х. Эпштейн с соавторами (Epstein et al., 2017) устойчивый линейный тренд изменения индекса на интервале с 1982 по 2017 гг. характеризуется темпом роста около 7 × 10<sup>-7</sup> ед. NDVI/год. Однако в региональном плане изменения NDVI неодина-

ковы и различаются не только по темпам и амплитуде, но и по направленности изменений. Если в период с 1982 по 1998 гг. практически на всей территории тундры наблюдалось увеличение NDVI, то в период с 1999 по 2015 гг. на больших территориях биома (устье Юкона на Аляске, арктические острова Канады, восточноевропейские тундры, значительная часть Таймыра) величина NDVI уменьшилась (Phatt et al., 2017). Условно указанные процессы именуются как "позеленение" и "побурение" тундры. В Евразии территории, где происходит "позеленение" и "побурение" растительного покрова тундры, почти сравнялись (Тишков и др., 2018).

Пространственное и временное различие территорий в величинах фитомассы и NDVI связано с неоднородностью температурных полей, других, связанных с температурой воздуха факторов, влияющих на интенсивность фотосинтеза — водного режима, глубины протаивания многолетнемерзлого слоя, температуры почвы, а также с особенностями физиологии тундровых растений, приспособленных для жизни в Арктике с коротким вегетационным сезоном и низкой температурой воздуха.

Представление о структурных изменениях растительных сообществ тундры было получено при повторных работах на территориях, где ранее ботанические проводились исследования. Это наблюдения на Таймыре на Тарейском стационаре с интервалом 40 лет (Матвеева и др., 2014), на Диксоне с интервалом 30 лет (Матвеева, Заноха, 2017), на восточноевропейском Севере (Большеземельская и Малоземельская тундры, острова Баренцева моря) с интервалом 16-18 лет (Лавриненко, Лавриненко, 2013, 2018). Как показали результаты работ, структура растительного покрова и состав флоры зональных сообществ не изменились, несмотря на инструментально зафиксированное увеличение температуры воздуха и почвы.

Отметим, что по данным метеонаблюдений на севере Средней Сибири за последние 50 лет среднегодовая температура воздуха по линейному тренду возросла примерно на 2.6°С, летняя увеличилась на 1.7°С, весенняя на 2.8°С. На Таймыре в результате таяния жильных льдов произошли глубокие мезорельефные изменения ландшафта, однако это не привело к нарушению стабильности растительного покрова (Матвеева, 2014; Матвеева, Заноха, 2017). Можно предположить, что в среднесрочной перспективе зональные сообщества сохранят структуру стабильной, а их реакция на потепление климата будет состоять в росте фитомассы в рамках сложившейся фитоструктуры. В дальнейшем неизбежны качественные структурные изменения сообществ с продвижением

зональных границ в направлении температурного градиента.

Модель климатогенной динамики растительного покрова представлена в работе (Арефьев и др., 2017). При этом постулируется, что при потеплении вектор состояния растительного покрова северной зоны будет приобретать значения, соответствующие растительному образу формации сопряженной южной зоны, если они принадлежат одной ландшафтно-подобной группе.

Средний запас зеленой фитомассы для различных территорий в подзоне южной субарктической тундры на водоразделах составляет около 120 г/м<sup>2</sup>, на склонах – 220 г/м<sup>2</sup> (Базилевич, 1993). Для кустарников доля зеленой фитомассы от общей надземной составляет около 10%, для кустарничков – около 30%. Эти данные близки к полученным на Походском стационаре (устье р. Колыма) для кустарниковой ивы – доля биомассы листьев составляет 12–15%, для березы – от 7 до 9% от общей фитомассы (Андреев и др., 1978).

Примем следующие допущения о свойствах компонент растительного сообщества на пике вегетации, т. е. при максимальных за период вегетации значениях ХИ (или, что то же, - максимальных значениях NDVI). Во-первых, *Сі* сохраняет свое значение постоянным независимо от значений ХИ, во-вторых, изменение хлорофиллового индекса связано исключительно с изменением массы фитотрофных органов растений, в-третьих, соотношение масс Рі фитотрофных органов для выделенных групп растений сообщества является постоянным независимо от их величины (или, что то же, от величины ХИ). Эти предположения соответствуют стационарному сообществу, отклик которого на изменения условий среды и хлорофиллового индекса состоит в пропорциональном изменении автотрофной фитомассы всех его компонент без изменения структуры сообщества:

$$Pi/Pbi = XII/XIIb$$
,

где *Pbi* — базовые значения автотрофной фитомассы, полученные путем наземных измерений, XИ*b* — базовые значения хлорофиллового индекса, рассчитанные по *Pbi*, XИ — фактическое значение хлорофиллового индекса, определенное на основе измеренного (или рассчитанного) значения NDVI.

Отсюда прогнозируемые величины *Pi*, величины общей зеленой фитомассы *Pg* и общей надземной фитомассы сообщества *Ps* будут определяться из соотношений:

$$Pi = Pbi \times XW/XWb, \quad Pg = \sum_{i}^{n} Pi,$$
  
 $Ps = \sum_{i}^{n} (Pi/Ki),$ 

где *Ki* — доля зеленой фитомассы в надземной фитомассе растений *i*-группы.

С учетом низкой точности наземных измерений как запасов фитомассы, так и других характеристик растительных сообществ тундры, для расчета полной надземной фитомассы могут быть использованы не конкретные для сообщества, а обобщенные литературные данные. В частности, это касается данных о соотношении зеленой фитомассы и массы одревесневевших частей растений (Андреев и др., 1978; Базилевич, 1997).

Для имитации в модели структурной динамики сообществ третье ограничение должно быть снято, а *Pi* должны быть заданы как функции XИ. Нахождение таких функций связано с проведением дополнительных исследований, что выходит за рамки нашей работы.

#### ОБ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ ФИТОМАССЫ ПО NDVI

Проверка адекватности модели проведена с использованием данных о запасах зеленой фитомассы в редкоивовых осоково-кустарничковомоховых растительных сообществах о. Колгуев, выбранных в качестве объекта моделирования. По результатам наземных работ, проведенных на острове в 2007 г., запас сухой зеленой фитомассы сообщества находится в пределах от 180 до 235 г/м<sup>2</sup>. Запас включает листву кустарниковых ив — 30–60 г/м<sup>2</sup>, листву стланиковой березки — 50–60 г/м<sup>2</sup>, листву кустарничковых ив — 10–20 г/м<sup>2</sup>, травянистую растительность — 15 г/м<sup>2</sup>, мхи — 80 г/м<sup>2</sup>.

Содержание хлорофилла в листьях ивы и березки по литературным данным (Головко и др., 2010) составляет около 5.1 мг/г в сухой массе, в травянистых растениях — около 4 мг/г, в сухой массе мхов — около 2 мг/г. Значение XИ сообщества, рассчитанное по формуле (4), находится в диапазоне от 0.68 до 0.93 г/м<sup>2</sup>.

Сравним эти данные с результатами модельных расчетов. Величины NDVI были рассчитаны на моделях по метеоусловиям 2007 г. и составили: по регрессионной модели – 0.61, по модели на базе ИНС – 0.59, по модели на базе нечетко-возможностного подхода – 0.56. Величина XИ, соответствующая этим значениям NDVI и рассчитанная по формуле (3), находится диапазоне от 0.84 до 0.95, а величина зеленой фитомассы сообщества – в диапазоне от 215 до 242 г/м<sup>2</sup>. Расчеты выполнялись при средних значениях соотношений зеленой фитомассы групп растений сообщества. По спутниковым данным среднее значение NDVI для участков с таким типом растительности составляло 0.62 (табл. 1). В пересчете на зеленую фитомассу это составляло около 250 г/м<sup>2</sup>. Таким образом, оценки зеленой фитомассы сообщества, полученные в результате наземных измерений, модельных расчетов и расчетов по фактическому NDVI, имели близкие величины.

При определении надземной фитомассы сообщества учитывалась масса одревесневевших частей стланиковой березки, кустарниковых и кустарничковых ив. Расчеты выполнялись с использованием литературных данных о соотношении зеленой и одревесневевшей компонент фитомассы тундровых видов растений (Андреев и др., 1978). По нашим оценкам, запас надземной фитомассы редкоивового-осоково-кустарничковогомохового сообщества составлял около 1000 г/м<sup>2</sup>. Эта величина вполне сопоставима с данными о запасах фитомассы в других районах южных субарктических тундр Евразии (Базилевич, 1993).

Расчет фитомассы был проведен также по обобщенной формуле, отражающей связь надземной фитомассы с NDVI (Reynolds et al., 2012) для российской Арктики (Eurasia Arctic Transect). Для принятого нами диапазона NDVI (от 0.56 до 0.62) фитомасса находится в пределах 570–860 г/м<sup>2</sup>, что является достаточно хорошим приближением, учитывая принятые нами допущения и обобщенный характер формулы Рейнолдса (Raynolds, 2012).

Полученные результаты подтверждают адекватность модели оценивания фитомассы по NDVI. Это подтверждает возможность использования фактических или прогнозируемых значений NDVI для определения массы автотрофных органов растений и оценки запасов фитомассы растительных сообществ тундры.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все вышеизложенное позволяет сделать следующие выводы.

1. Задача оценивания и прогнозирования динамики фитомассы растительных сообществ тундры методологически правильно отнесена к слабоформализованной, для решения которой предложена двухэтапная методика: первоначально приемлемыми математическими методами строятся модели динамики NDVI, затем, на втором этапе, расчетные величины NDVI представляются метрическим показателем хлорофиллового индекса XИ и выполняется переход к фитомассе.

2. Многомодельное оценивание и прогнозирование динамики фитомассы растительных сообществ тундры на основе спутниковых снимков осуществлено тремя различными методами построения математических моделей, и при этом получены следующие результаты:

 – как с математических, так и общенаучных методологических позиций наиболее подходящим для построения прогностических моделей слабоформализованных природных систем является нечетко-возможностный подход;

 показана принципиальная возможность прогнозирования фитомассы растительных сообществ на основе ИНС при стационарности процессов измерения и действия внешних факторов с обучением сети на основе ретроспективных данных о факторах климата и индексе NDVI;

 – экспериментальная апробация методики показала возможность использовать фактические или прогнозируемые значения NDVI как "промежуточной" переменной для определения массы автотрофных органов растений и оценки надземной фитомассы с высокой степенью методологической обусловленности.

3. Адекватность методики установлена с использованием данных по растительности тундры. Однако подход к решению задачи – моделирование динамики фитомассы растительных сообществ с использованием NDVI и XИ – является в достаточной мере общим и может быть рекомендован для применения к сообществам других природно-климатических биомов при соответствующей корректировке моделей в соответствии с особенностями объекта и условий среды.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке бюджетных тем № № 0074-2019-0009, 0073-2019-0004 и АААА-А19-119032090096-4, гранта РНФ № 20-17-00160.

Разработка искусственной нейронной сети также выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-37-90112.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александрова В.Д., Шамурин В.Ф. Методика определения запасов и структуры фитомассы тундровых сообществ // Научный совет по проблеме "Комплексное биогеоценотическое изучение живой природы и научные основы ее рационального освоения и охраны". Секция: "Изучение биогеоценозов тундры и лесотундры". Л.: Наука. 1972. С. 60–64.

Андреев В.Н., Галактионова Т.Ф., Говоров П.М., Захаров П.И., Неустроева В.И., Саввинов Д.Д., Торговкина Е.Е. Сезонная и погодовая динамика фитомассы в субарктической тундре / Ред. В.Н. Андреев. Новосибирск: изд-во Наука СО, 1978. 190 с.

Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Разживин В.Ю. Моделирование биопродуктивности в арктической зоне России с использованием спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 3. С. 60–70.

Арефьев С.П., Глазунов В.А., Говорков Д.А., Московченко Д.В., Соловьев И.Г., Цибульский В.Р. Модель и анализ климатогенной динамики растительного покрова на примере данных полуострова Ямал // Математическая биология и биоинформатика. 2017. Т. 12. № 2. С. 252–272.

Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.

Бондур В.Г. Методы моделирования полей излучения на входе аэрокосмических систем дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 5. С. 16–27.

Бондур В.Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.

https://doi.org/10.7868/S0205961414010035

Бондур В.Г., Воробьев В.Е. Космический мониторинг импактных районов Арктики // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 4–24.

https://doi.org/10.7868/S0205961415040028

Бондур В.Г., Старченков С.А. Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Оценка пространственной анизотропии неоднородностей лесной растительности при различных азимутальных углах радарного поляриметрического зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 92–103.

https://doi.org/10.31857/S0205-96142019392-103

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н. Анализ текстуры радиолокационных изображений растительности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 5. С. 9–14.

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н. Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 6. С. 64–73.

Воронин П.Ю. Хлорофильный индекс и фотосинтетический сток углерода северной Евразии // Физиология растений. 2015. Т. 53. № 5. С. 777–785.

Головко Т.К., Далько И.В., Дымова О.В., Таболенкова Г.Н. Пигментный комплекс растений природной флоры европейского северо-запада // Изв. Коми НЦ Уро РАН. 2010. № 1. С. 39–46.

Дюкарев Е.А., Алексеева М.Н., Головацкая Е.А. Исследование растительного покрова болотных экосистем по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 2. С. 38–51.

*Елсаков В.В.* Использование материалов спутниковых съемок для анализа значений хлорофиллового индекса тундровых фитоценозов // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 1. С. 60–70.

*Елсаков В.В., Щанов В.М.* Современные изменения растительного покрова пастбищ северного оленя Ти-манской тундры по результатам анализа данных спутниковой съемки // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 128–142.

Зуев В.В., Короткова Е.М., Павлинский А.В. Климатически обусловленные изменения растительного покрова тайги и тундры Западной Сибири в 1982—2015 гг. по данным спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 66—76.

Иванова К.В. Динамика индекса NDVI для разных классов территориальных единиц растительности ти-

пичных тундр // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2020. Т. 15. № 5. С. 194–202.

Игнатьев М.Б., Марлей В.Е., Михайлов В.В., Спесивцев А.В. Моделирование слабо фомализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. 501 с.

Лавриненко И.А. Динамика растительного покрова острова Вайгач под влиянием климатических изменений // Сборник статей: "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)". Институт космических исследований РАН, 2013. Т. 8. № 1. С. 183–189.

Лавриненко И.А., Лавриненко О.В. Влияние климатических изменений на растительный покров островов Баренцева моря // Тр. Карельского НЦ РАН. № 6. 2013. С. 4–16.

Лавриненко О.В, Лавриненко И.А. Зональная растительность равнинных восточноевропейских тундр // Растительность России. 2018. № 32. С. 35–108. https://doi.org/10.31111/vegrus/2018.32.35

Лавриненко О.В., Лавриненко И.А. Стабильность состава и структуры тундровых сообществ в изменяющемся климате // Тез. докладов международной научной конференции "Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики". г. Санкт-Петербург, 2–4 марта 2020 г. СПб: ГНЦ РФ ААНИИ, 2020. 408 с. С. 387–391.

*Матвеева Н.В., Заноха Л.Л., Янченко З.А.* Изменения во флоре сосудистых растений в районе Тарейского биогеоценологического стационара (среднее течение р. Пясины, Западный Таймыр) с 1970 по 2010 гг. // Бот. журн. 2014. Т. 99. № 8. С. 841–867.

*Матвеева Н.В., Заноха Л.Л.* Изменения во флоре сосудистых растений в окрестностях пос. Диксон (Западный Таймыр) с 1980 по 2012 г. // Бот. журн. 2017. Т. 102. № 6. С. 812–846.

Медведев С.С. Физиология растений. СПб.: СПб ГУ. 2006.

*Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 328 с.

Спесивцев А.В., Домшенко Н.Г. Эксперт как "интеллектуальная измерительно-диагностическая система" // Сб. докладов. XIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 23–25 июля 2010, Санкт-Петербург. Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2010. Т. 2. С. 28–34.

*Тарчевский И.А.* Основы фотосинтеза. М.: Высшая школа. 1977. 253 с.

Тишков А.А., Белоновская Е.А., Вайсфельд М.А., Глазов П.М., Кренке А.Н., Тертитский Г.М. "Позеленение" тундры как драйвер современной динамики арктической биоты // Арктика: экология и экономика. 2018. № 2(30). С. 31–44.

Цельникер Ю.Л., Малкина Е.С. Хлорофилловый индекс как показатель годичной аккумуляции углерода древостоями леса // Физиология растений. 1994. Т. 41. № 3. С. 325–330.

Шевырногов А.П., Письман Т.И., Кононова Н.А., Ботович И.Ю, Ларько А.А., Высоцкая Г.С. Сезонная динамика растительности залежных земель красноярской лесостепи по наземным и спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 39–51.

Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K., Bieniek P.A., Epstein H.E., Comiso J.C., Pinzon J.E., Tucker C.J., Steele M., Ermold W., Zhang J. Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables // Environ. Res. Lett. 2017. V. 12. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6b0b

Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K., Bieniek P.A., Epstein H.E., Comiso J.C., Pinzon J.E., Tucker C.J., Polyakov I.V. Recent declines in warming and vegetation greening trends over pan-Arctic tundra // Remote Sens. 2018. № 4. 4229–4254.

*Chang T., Rasmussen B.P., Dickson B.G., Zachmann L.J.* Chimera: A multi-task recurrent convolutional neural network for forest classification and structural estimation // Remote Sens. 2019. V. 11. Iss. 7. № 768.

Epstein H., Bhatt U., Raynolds M., Walker D., Forbes B., Phoenix G., Bjerke J., Tommervik H., Karlsen S., Myneni R., Park T., Goetz S., Jia J. Tundra Greeness. 2018. URL: https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2018/ ArtMID/7878/ArticleID/777/Tundra-Greenness

*Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.* The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction, Second Edition. Springer, 2013. 745 p.

*Karlsen S.R., Anderson H.B., van der Wal R., Hansen B.B.* A new NDVI measure that overcomes data sparsity in cloud-covered regions predicts annual variation in ground-based estimates of high arctic plant productivity // Environ. Res. Lett. 2018. 13:025011.

Landsat Surface Reflectance-derived Normalized Difference Vegetation Index https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-normalized-difference-vegetationindex?qt-science\_support\_page\_related\_con=0#qt-science\_support\_page\_related\_con

*Li P., Jiang L., Feng Z.* Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors // Remote Sens. 2014. № 6.P. 310–329. https://doi.org/10.3390/rs6010310

*Pouliot D., Latifovic R., Pasher J., Duffe J.* Assessment of convolution neural networks for wetland mapping with landsat in the central Canadian boreal forest region // Remote Sens. 2019. V. 11. Iss. 7. № 772.

Raynolds M., Walker D., Epstein H., Pinzon J., Tucker C. A new estimate of tundra-biomphytomass from trans-Arctic field data and AVHRR NDV // Remote Sensing Letters. 2012. V. 3. № 5. Sept. P. 403–411.

USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center Science Processing Architecture (ESPA) On Demand Interface (ESPA). URL: https://espa.cr.usgs.gov/

Walker D., Epstein H., Jia G., Balser A., Copass C., Edwards E., Gould W. Hollings J., Knudson J., Maier H., Moody A., Raynolds M. Phytomass, LAI, and NDVI in northern Alaska: Relationships to summer warmth, soil pH, plant functional types, and extrapolation to the circumpolar Arctic // J. Geograph. Res. 2003. V. 108. № D2. P. 8169. https://doi.org/10.1029/2001JD000986

## Multi-Model Evaluation of Phytomass Dynamics of Tundra Plant Communities Based on Satellite Images

## V. V. Mikhailov<sup>*a*</sup>, A. V. Spesivtsev<sup>*a*</sup>, V. A. Sobolevsky<sup>*a*</sup>, N. K. Kartashev<sup>*a*</sup>, I. A. Lavrinenko<sup>*b*</sup>, O. V. Lavrinenko<sup>*b*</sup>, and V. A. Spesivtsev<sup>*a*</sup>

<sup>a</sup>St. Petersburg Federal Research Centre Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia <sup>b</sup>Komarov Botanical Institute Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

The paper presents a two-stage method for solving the problem of predicting phytomass and the corresponding two-component model of the dynamics of phytomass. At the first stage of the solution, a polymodel approach was applied to the selection and construction of a prognostic model of NDVI dynamics. The classical regression technology is used, as well as cognitive modeling methods focused on solving poorly formalized problems - the technology of artificial neural networks and a fuzzy-possible approach. At the second stage, the transition from dimensionless NDVI indicators to metric values of the chlorophyll index is performed. The mass of autotrophic organs of plants is estimated from the chlorophyll index and the phytomass of the community is determined taking into account the peculiarities of its accumulation and distribution in plants. The development and verification of the model was carried out according to NDVI and phytomass stocks of plant communities of Kolguev Island. According to the simulation results, the stock of green phytomass of the simulated community is in the range from 215 to 242 g/m<sup>2</sup>, which is comparable in order of magnitude with the actual estimates – 180–235 g/m<sup>2</sup>. A comparative analysis of modeling methods s carried out.

*Keywords*: polymodel approach, phytomass, NDVI, chlorophyll index, regression, artificial neural network, fuzzy-possible model

#### REFERENCES

*Aleksandrova V.N., Shamurin V.F.* Metodika opredelenija zapasov I strukturi fitomassi tundrovih coobchestv // Hauchni sovet po probleme "Kompleksnoe biogeotsenoticheskoe izuchenie zivoi prirodi I nauchnii osnovi ee rasionalnogo osvoenija I ohrani". Sektsija "Izutchenie biogeotsenozov tundry I lesotundri". L.: Nauka. 1972. P. 60–64 (in Russian).

Andreev V.N., Galaktionova T.F., Govorov P.M., Zaxarov P.I., Neustroeva V.I., Savvinov D.D., Torgovkina E.E. Sezonnaja i pogodovaja dinamika fitomassi v cubarktichevskoi tundra / Red. V.N. Andreev. Novosibirsk: Izd. Nauka SO, 1978. 190 p. (In Russian).

Anisimov O.A., Ziltsova E.L., Razjivin V.J. Modelirovanie bioproduktivnosti v arkticheskoi zone Rossii s ispolzovaniem sputnikovih nabludenii // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2015. № 3. P. 60–70 (in Russian).

*Arefiev S.P., Glazunov V.A., Govorkov V.A., Moskvitchenko D.V., Soloviev I.G., Tsibilski V.R.* Model i analiz klimatogennoi dinamiki rastitelnogo pokrova na primere dannih poluostrova Jamal // Matemaicheskaja biologija i bioinformatika. 2017. T. 12. № 2. P. 252–272 (in Russian).

*Bazilevich P.J.* Biologitcheskaja produktivnost ekosistem Severnoi Evrazii. M.: Nauka, 1993. 293 p. (In Russian).

Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K., Bieniek P.A., Epstein H.E., Comiso J.C., Pinzon J.E., Tucker C.J., Steele M., Ermold W., Zhang J. Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables // Environ. Res. Lett. 2017. 12. DOI: 10.1088/1748-9326/aa6b0b

Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K., Bieniek P.A., Epstein H.E., Comiso J.C., Pinzon J.E., Tucker C.J., Polyakov I.V. Recent declines in warming and vegetation greening trends over pan-Arctic tundra // Remote Sens. 2018.  $\mathbb{N}_{2}$  4. P. 4229–4254.

Bondur V.G. Metody modelirovaniya poley izlucheniya na vkhode aerokosmicheskikh sistem distantsionnogo zon-

dirovaniya [The Methods of the Emission Model Field Which Be Formed on Enter of Airspace Remote Sensing System] // Issledovanie Zemli is Kosmosa. 2000. № 5. P. 16–27 (In Russian).

Bondur V.G. Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2014. V. 50. № 9. P. 840–852. DOI: 10.1134/S0001433814090060

Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Spatial anisotropy assessment of the forest vegetation heterogeneity at different azimuth angles of radar polarimetric sensing // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2019. V. 55. № 9. P. 926–934. DOI: 10.1134/S0001433819090093

*Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N.* Analiz tekstury radiolokatsionnykh izobrazheniy rastitelnosti [Texture analysis of radar images of vegetation] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya I aerofotosemka. 2008. Iss. 5. P. 9–14 (In Russian).

*Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N.* Distantsionnoe zondirovanie rastitel'nosti optiko-mikrovolnovymi metodami [Remote sensing of vegetation by optical microwave methods] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya I aerofotosemka. 2008. Iss. 6. P. 64–73 (In Russian).

Bondur V.G., Starchenkov S.A. Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskih izobrazheniy [Methods and programs for aerospace imagery processing and classification] // Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography. 2001. № 3. P. 118–143 (In Russian).

*Bondur V.G., Vorobev V.E.* Satellite Monitoring of Impact Arctic Regions // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2015. V. 51. № 9. P. 949–968. DOI: 10.1134/S0001433815090054

*Chang T., Rasmussen B.P., Dickson B.G., Zachmann L.J.* Chimera: A multi-task recurrent convolutional neural network for forest classification and structural estimation // Remote Sens. 2019. V. 11. Iss. 7. № 768. *Djukarev E.A. Alekseeva V.N., Golovatskaja E.A.* Issledovanie rastitelnogo pokrova bolotnih ekosistem po sputnikovim dannim // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2017. № 2. P. 38–51 (In Russian).

*Elsakov V.V.* Ispolzobanie materialov sputnikovih siemok dla analiza znachenii hlorofillovogo indeksa tundrovih fitotsenozov // Issled. Zemli iz kosmosa. 2013. № 1. P. 60–70 (In Russian).

*Elsakov V.V., Shanov V.M.* Sovremennie izmenenija rastitelnogo pokrova pastbisch severnogo olenja Timanskoi tundra po rezultatam analiza dannih sputnikovoi sjemki // Sovremennii problemy distannsionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa. 2019. V. 16. № 2. P. 128–142 (In Russian).

Epstein H., Bhatt U., Raynolds M., Walker D., Forbes B., Phoenix G., Bjerke J., Tommervik H., Karlsen S., Myneni R., Park T., Goetz S., Jia J. Tundra Greeness. 2018. URL: https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2018/ ArtMID/7878/ArticleID/777/Tundra-Greenness

Golovko T.K., Dalko I.V., Dimovva O.V., Tabolenkova D.N. Pigmentni kompleks rasteni prirodnoi flori evropeiskogo severo-zapada // Izv. Komi NC Yro RAN. 2010. № 1. P. 39–46 (In Russian).

*Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.* The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction, Second Edition. Springer, 2013. 745 p.

Ignatiev M.B., Maplej B.E., Mikhailov V.V., Spesivtsev A.V. Modelirovanie slaboformalizovannih system na osnove javnih i nejavnih ekspertnih znanii. SPb.: POLITEH-PRESS, 2018. 501 p(In Russian)..

*Ivanova K.V.* Dinamika indeksa NDVI dla raznih klassov territorialnih edinits rastitelnosti tipichnih tundr // Sovremennii problemy distannsionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa. 2020. V. 15. № 5. P. 194–202 (In Russian).

*Karlsen S.R., Anderson H.B., van der Wal R., Hansen B.B.* A new NDVI measure that overcomes data sparsity in cloud-covered regions predicts annual variation in ground-based estimates of high arctic plant productivity // Environ. Res. Lett. 2018. 13:025011.

Landsat Surface Reflectance-derived Normalized Difference Vegetation Index. URL: https://www.usgs.gov/landresources/nli/landsat/landsat-normalized-difference-vegetation-index?qt-science\_support\_page\_related\_con= 0#qt-science\_support\_page\_related\_con

*Lavrinenko I.A.* Dinamika rastitelnogo pokrova ostrova Vaigatch pod vlijaniem klimaticheskih izmenenij // Sovremennii problemy distannsionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa. 2013. T. 8. № 1. P. 183–189 (In Russian).

*Lavrinenko I.A., Lavrinenko O.V.* Vlijanie klimaticheskih izmenenii na rastitelnii pokov ostrovov Barintseva morja // Tr. Karelskogo NTSE RAN. № 6. 2013. P. 4–16 (In Russian).

*Lavrinenko O.V., Lavrinenko I.V.* Zonalnaja rastitlnost ravninnih vostochnoevropeiskih tundr // Rastitelnost Rossii. 2018. № 32. P. 35–108 (In Russian).

*Lavrinenko O.V., Lavrinenko I.A.* Stabilnost sostava i strukturi tundrovih soobschestv v izmeniajuschemto climate // Tez. Dokladov mezdunarodnoi nauschnoi konferenciii "Kompleksnii issledovanija prirodnoi sredi Arctiki I Antarktiki" Sankt-Peterburg, 2–4 marta 2020 g. SPb.:GNC PF AANII, 2020. 408 p. P. 387–391 (In Russian).

*Li P., Jiang L., Feng Z.* Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors // Remote Sens. 2014. № 6. P. 310–329. DOI: 10.3390/rs6010310

*Matveeva N.V., Zanoha L.L., Janchenko Z.A.* Izmenenija vo flore sosudistih rastenii v rajone Tareiskogo biogeotsenologitcheskogo statsionara (srednee techenie r. Pjasina, Zapadni Taimir) s 1979 po 2012 gg. //Bot. Jurn. 2014. T. 99. № 8. P. 841–867 (In Russian).

*Matveeva N.V., Zanoha L.L.,* Izmenenija vo flore sosudistih rastenii v okrestnostiah pos. Dikson (Zapadni Taimir) s 1970 po 2012 gg. // Bot. Jurn. 2017. V. 102. № 6. P. 812–846 (In Russian).

*Medvedev S.S.* Fiziologija pastenii. SPb.: SPb GU, 2006 (In Russian).

*Moiseev N.N.* Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza. M.: Nauka, 1981. 328 p. (In Russian).

*Pouliot D., Latifovic R., Pasher J., Duffe J.* Assessment of convolution neural networks for wetland mapping with landsat in the central Canadian boreal forest region // Remote Sens. 2019. V. 11. Iss. 7. № 772.

Raynolds M., Walker D., Epstein H., Pinzon J., Tucker C. A new estimate of tundra-biomphytomass from trans-Arctic field data and AVHRR NDVI // Remote Sensing Letters. 2012. V. 3. № 5. Sept. 2012. P. 403–411.

Shevirnogov A.P., Pisman T.I., Kononogova N.A., Botovich I.J., Larko A.A., Visockaja G.S. Sezonnaja dinamika rastitelnosti zalezhnyh zemel' krasnoyarskoj lesostepi po nazemnim i sputnikovim dannim // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2018. № 6. P. 39–51 (In Russian).

*Spesivtsev A.V., Domshenko N.G.* Ekspert kak "intellektualnaya izmeritelno-diagnosticheskaya sistema" // Sb. dokladov. XIII Mezhdunarodnaya konferenciya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam SCM 23–25 iyulya 2010, Sankt-Peterburg. Sankt-Peterburg: Izdatelstvo SPbGETU "LETI", 2010. V. 2. P. 28–34 (In Russian).

*Tarchevski I.A.* Osnovi fotosinteza. M.: Vysshaya shkola, 1977. 253 p. (In Russian).

*Tishkov A.A., Belonovskaa E.A., Vaisfeld M.A., Glazov P.M., Krenke A.N., Tertitskii G.M.* "Pozelenenie" tundra kak daiver sovremennoi dinamiki arkticheskoi bioti // Arktika: ekologija i ekonomika. 2018. № 2(30). P. 31–44 (In Russian).

*Tselniker J.L., Malkina E.S.* Hlorofillovi indeks kak pokazatel godichnoi akkumuljacii ugleroda drevostojami lesa // Fiziologija rastenii. 1994. T. 41. № 3. P. 325–330 (In Russian).

USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center Science Processing Architecture (ESPA) On Demand Interface (ESPA). URL: https://espa.cr.usgs.gov/

*Voronin P.J.* Hlorofillovi indeks i fotosinteticheski stok ugleroda Severnoi Evrazii // Fiziologija rastenii. 2015. V. 53. № 5. P. 777–785 (In Russian).

Walker D., Epstein H., Jia G., Balser A., Copass C., Edwards E., Gould W. Hollings J., Knudson J., Maier H., Moody A., Raynolds M. Phytomass, LAI, and NDVI in northern Alaska: Relationships to summer warmth, soil pH, plant functional types, and extrapolation to the circumpolar Arctic. // J. Geographycal Researsh. 2003. V. 108. № D2. P. 8169. DOI: 10.1029/2001JD000986

Zuev V.V., Korotkova E.M., Pavlinski A.V. Klimaticheski obuslovlennii izmenenija rastitelnogo pokrova taigi i tundra Zapadnoi Sibiri v 1982–2015 gg. Po dannim sputnikovih nabludenii // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2019. № 6. P. 66–76 (In Russian).

### \_\_\_\_\_ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ \_\_\_\_\_ Космической информации

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСКИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЕЙ ПО ДАННЫМ ПРИБОРА МСУ-МР СПУТНИКА "МЕТЕОР-М" № 2

© 2021 г. М. О. Кучма<sup>*a*, \*</sup>, З. Н. Лотарева<sup>*a*</sup>, Л. А. Слесаренко<sup>*a*</sup>

<sup>а</sup>Дальневосточный центр Федерального государственного бюджетного учреждения "Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета", Хабаровск, Россия \*E-mail: m.kuchma@dvrcpod.ru

Поступила в редакцию 08.09.2020 г.

В настоящей работе рассматривается технология определения маски ледяного покрова с использованием сверточной нейронной сети применительно к данным многозонального сканирующего устройства малого разрешения, установленного на российском космическом аппарате "Метеор-М" № 2. Описаны критерии отбора параметров, участвующих в обучении нейронной сети, а также процесс определения размера текстур. С использованием метрик машинного обучения определена точность классификации разработанной модели. Валидация результатов показала, что полученный алгоритм имеет точность 94.9 и 96.7% по сравнению с масками ледяного покрова по данным продукта MOD10 прибора MODIS и архивными картами-схемами ледовой обстановки, построенными в соответствии с международной номенклатурой ВМО по морскому льду.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование Земли, МСУ-МР, сверточная нейронная сеть, текстуры, лед, маска ледяного покрова

DOI: 10.31857/S0205961421020032

#### введение

В настоящее время данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса играют важную роль в обеспечении различных сфер деятельности человека, в том числе на морских акваториях. Оперативный анализ ледовой обстановки замерзающих морей позволяет своевременно оценивать ледовую обстановку на судоходных трассах, планировать ледокольные операции, повышать безопасность навигации, рыболовства и выполнения работ на морском шельфе. Согласно морской доктрине Российской Федерации на период до 2020 г., роль морских перевозок для жизнеобеспечения районов Крайнего Севера и Дальнего Востока продолжает оставаться решающей в обеспечении внутригосударственной и внешнеэкономической деятельности.

Необходимость создания и поддержания отечественной группировки космических аппаратов гидрометеорологического, океанографического, геофизического назначения и мониторинга окружающей среды в соответствии с утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 3 сентября 2010 г. № 1458-р "Стратегией деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 года" предусматривает одновременное развитие технологий и методик обработки и представления данных российских спутниковых миссий.

Поэтапное увеличение полярно-орбитальной группировки космических аппаратов (КА) серии "Метеор-М" дает специалистам большой дополнительный объем исходной информации о состоянии окружающей среды, в том числе ледовой обстановки на морских акваториях, однако на текущий момент разработанных и внедренных в оперативную практику методик детектирования и картирования льда по данным прибора МСУ-МР КА этой серии нет.

Описанные выше государственные задачи определяют актуальность разработки технологий автоматического построения карт-схем ледовой обстановки с использованием данных российского КА "Метеор-М" № 2, а в дальнейшем и всей группировки КА этой серии. В настоящей статье представлены первые результаты работ по детектированию маски ледяного покрова по данным многозонального сканирующего устройства малого разрешения (МСУ-МР) (Акимов и др., 2015) КА "Метеор-М" № 2.

#### ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

Лед является сложной структурой и обладает массой параметров, которые зависят от освеще-



Рис. 1. Спектры солнечного излучения, приходящего на верхнюю границу атмосферы и на поверхность Земли.

ния, времени года, широты и других характеристик. Кроме этого, лед, в зависимости от своего состава, имеет разную отражательную способность, влияющую на его обнаружение со спутника. Доля солнечного излучения, отраженного льдом, снегом или водой, имеет резко выраженную спектральную зависимость, изученную во многих работах. В (Смирнов, 2011) показано, что на длинах волн до 0.9 мкм коэффициент спектральной яркости (КСЯ), характеризующий долю отраженного солнечного излучения (%), максимален, а после 0.9 мкм — в ближней ИК-области, уменьшается почти до нуля. КСЯ молодого морского льда зависит от его толщины (Jezek et al., 1998), и одновременно для толстого льда наблюдается зависимость КСЯ от сезона измерения. Пониженные значения КСЯ характерны для загрязненного льда, в то время как чистый лед обладает сравнительно высокой прозрачностью в видимом диапазоне спектра (Dorsey, 1940; Паундер, 1967).

В настоящее время известно множество исследований по оценке границ и характеристик ледяного покрова по спутниковым данным (Baker, 2011; Jin et al., 2020; Hall et al., 2017; Key et al., 2013; Meier et al., 2017). Анализ ряда таких исследований показывает, что существующие алгоритмы тематической интерпретации параметров ледяного покрова могут по-разному функционировать в различных географических и климатических условиях. Помимо этого, на детектирование льда влияет атмосферный пограничный слой, который имеет разные характеристики и параметры для различных широт (Minnett, 2007). Например, в полярных районах, где разность температур воздух - вода велика, воздух имеет низкую влажность, что оказывает значительное влияние на регистрируемые значения КСЯ в каналах спутникового прибора. Покажем это на примере прибора МСУ-МР КА "Метеор-М" № 2. Часть приходящей солнечной энергии рассеивается или поглощается атмосферой. Вследствие различной концентрации газов и аэрозолей искажения электромагнитного излучения неоднородны как в пространстве, так и на разных длинах волн. На рис. 1 показаны спектры солнечного излучения, приходящего на верхнюю границу атмосферы (ВГА) и на поверхность Земли, а также границы чувствительности 1, 2 и 3 каналов МСУ-МР.

Полосы поглощения водяного пара, представленные на рисунке штриховыми линиями, в основном оказывают влияние на 2 и 3 каналы MCУ-MP. Водяной пар напрямую коррелирует с влажностью воздуха, поэтому регистрируемые прибором значения КСЯ в этих каналах подвергаются изменению из-за его влияния. Помимо этого, большое значение имеют функция спектральной чувствительности и ширина каждого из каналов спутникового прибора, или иначе, спектральные характеристики, которые для каждого спутникового прибора уникальны. Для прибора MCУ-MP эти характеристики приведены на рис. 2. Остальные основные параметры прибора представлены в табл. 1.

Перечисленные факторы накладывают значительные ограничения на точность и достоверность глобального детектирования ледяного покрова, связанные как с состоянием самого льда, так и его географическим и сезонным распределением, что зачастую требует определения оптимальных пороговых значений для различных параметров атмосферы и водной поверхности, имеющих существенные пространственные и



Рис. 2. Функции спектральной чувствительности коротковолновых каналов МСУ-МР.

временные вариации. Помимо этого, как указано выше, пороговые значения подбираются к каждому спутниковому прибору в отдельности, поскольку их спектральные характеристики различаются. Другим подходом к задаче детектирования льда является применение алгоритмов машинного обучения, которые могут работать не только с каждым пикселем в отдельности, но и с текстурами, представляющими собой участки изображения (Бондур, Старченков, 2001). Такой подход наиболее эффективен на начальном этапе детектирования ледяного покрова, а именно построении маски льда.

Маска льда применяется не только для дальнейшего картирования характеристик ледяного покрова, таких как сплоченность, возрастные характеристики и т.д., но также и при вычислении метеорологических параметров облачности. Достоверная информация о наличии льда под тонкой (полупрозрачной) облачностью позволяет учесть влияние подстилающей поверхности на измерения в каналах инфракрасного диапазона и, как следствие, добиться большей точности при расчете параметров такой облачности на верхней границе облачности. Таким образом, маска льда служит не только заделом к возможности создания целого ряда продукции по ледовой обстановке по данным прибора МСУ-МР, но и к качественному улучшению уже имеющихся технологий получения параметров облачности, использующихся в прогнозировании.

Основываясь на анализе мирового опыта в области дистанционного зондирования Земли и обработки больших потоков спутниковых данных (Бондур, 2014; Бондур, Старченков, 2001), специалистами Дальневосточного центра НИЦ "Планета" ведутся активные работы по исследованию и реализации алгоритмов машинного обучения, в частности нейронных сетей, которые могут успешно применяться для задач классификации спутниковых изображений при решении различного рода тематических задач (Андреев и др., 2019; Блощинский и др., 2019; Крамарева и др., 2019a, б, в; Bloshchinskiy et al., 2020). В связи с этим для решения обозначенной проблемы будет применена методика контролируемого обучения нейронных сетей.

Таблица 1. Характеристики МСУ-МР

Характеристика	МСУ-МР
	0.52-0.72
Спектральные диапазоны (мкм)	0.7-1.1
	1.62-1.82
	3.5-4.1
	10.5-11.5
	11.5-12.5
Полоса обзора (км)	2900
Разрешение (км)	1

#### СОЗДАНИЕ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ

Для решения задачи детектирования ледяного покрова с помощью нейронных сетей по данным прибора МСУ-МР КА "Метеор-М" № 2 в работе рассматривается текстурный метод (Zang et al., 2016), где каждая текстура представляет собой сравнительно небольшой участок подстилающей поверхности и позволяет нейросети с достаточной точностью провести классификацию. Для реализации метода необходимо создать обучающую выборку (ОВ) на основе архивных спутниковых данных. В цифровом виде текстуры представляют собой трехмерные массивы, где третье измерение это параметры, с использованием которых нейросеть сможет с достаточной точностью провести разделение по классам (Бондур, 2014). Такими параметрами могут быть КСЯ. яркостная температура каналов спутникового прибора, углы Солнца, время, широта или различные вегетационные индексы.

Создание ОВ для нейросетевых алгоритмов является одним из важнейших подготовительных этапов, поскольку от ее качества и размера напрямую зависит результат обучения нейронной сети. Проблема создания ОВ заключается в проведении точной классификации объектов на спутниковых изображениях, которая может проводиться двумя способами: вручную и автоматически. Существующие на данный момент средства автоматизации этого процесса уступают в точности ручному способу классификации и вносят погрешность в результат (Топоров и др., 2019). В Дальневосточном центре НИЦ "Планета" имеется положительный опыт решения задач формирования различных ОВ маркированных данных (Андреев и др., 2019; Блощинский и др., 2019; Крамарева и др., 2019а, б, в; Bloshchinskiy et al., 2020), текстуры которых относятся к классам: облако, лед, вода и т.д. Необходимо отметить, что для удобства ручного набора ОВ в Дальневосточном центре НИЦ "Планета" была разработана программа "PlanetaMeteorTexMaker" (Андреев и др., 2018), которая предоставляет инструментарий для формирования выборки шаблонов, текстур и точек, выделенных оператором на спутниковых изображениях. С использованием этой программы оператор выбирает текстуру и отмечает класс, к которому она должна относиться.

При маркировке данных для OB авторами настоящей работы допускалось присутствие на текстуре объектов другого класса, однако центральный пиксель должен был обязательно соответствовать присваиваемому классу. Каждой отобранной текстуре присваивался один из трех классов: лед, лед под полупрозрачной облачностью или дымкой, вода. Стоит отметить, что классом лед подразумеваются все виды и состояния морского льда. Текстуры набиралась с использованием данных прибора MCУ-MP KA "Метеор-М" № 2 с разрешением 1 км на пиксель за период с октября 2017 г. по апрель 2019 г. В рамках решения поставленной задачи было маркировано примерно 130 спутниковых изображений, на которых отмечено около 17 тыс. текстур.

Каждая помеченная текстура принадлежала к определенному классу и характеризовалась 11 параметрами, получаемыми с прибора MCУ-MP: измерения в шести каналах прибора MCУ-MP, зенитный солнечный и спутниковый углы, относительный азимутальный угол, а также индексы Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) и Normalized Difference Snow Index (NDSI), которые рассчитывались по следующим формулам:

 $NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED), \qquad (1)$ 

NDSI = (RED - SWIR)/(RED + SWIR), (2)

где RED, NIR и SWIR – 1-й, 2-й и 3-й каналы прибора MCУ-MP соответственно.

Такие характеристики необходимы для выбора в дальнейшем оптимального набора параметров при обучении нейросетевого алгоритма.

#### ВЫБОР АРХИТЕКТУРЫ И ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

От выбора архитектуры сети зависит точность классификации, время обучения и время расчета, т.е. получения продукта. Поскольку разрабатываемый алгоритм будет использоваться в оперативной практике, то точность классификации и время расчета являются критичными параметрами ввиду того, что продукт, полученный не оперативно, теряет свою актуальность. В связи с этим была поставлена задача реализовать архитектуру, которая будет иметь минимальное время расчета без снижения точности.

Для создания и использования нейронной сети авторами работы использована библиотека keras, написанная на языке Python. При обучении нейронной сети и проведении всех расчетов использовался персональный компьютер с характеристиками: процессор Intel Core i7-6700K, O3V 32 ГБ, графический процессор NVIDIA GeForce 1060 3GB.

Для создания архитектуры нейронной сети необходимо определить размер входных данных, текстур, от которого зависит глубина нейросети. С учетом опыта разработки нейросетевых алгоритмов (Андреев и др., 2019; Блощинский и др., 2019; Крамарева и др., 2019а, б, в; Bloshchinskiy et al., 2020) специалистами Центра был определен предполагаемый размер текстур 11 × 11 пикселей. Далее было реализовано несколько тестовых архитектур (рис. 3). Архитектуры имеют одинаковые входы и выходы, поэтому для упрощения на рисунке пунктиром выделены отличительные элементы каждой модели.



Рис. 3. Варианты архитектур нейронных сетей: 1) архитектура № 1; 2) архитектура № 2; 3) архитектура № 3.

На рис. 3 введены обозначения, которые будут описаны ниже. Input – входные данные размерностью 11 × 11 пикселей (dim), имеющие 11 параметров (ch). Для всех слоев: f – количество выходных блоков, k — высота и ширина окна двумерной свертки, s – шаг свертки по высоте и ширине. Conv – сверточный двумерный слой "Conv2d" (Jav, 2016). ReLU – слой активации "Rectified linear unit" (ReLU), который имеет сходство с работой диода: значения меньше нуля принимаются за ноль, а значения больше нуля имеют линейную зависимость. BN – слой "BatchNormalization" (Ioffe, Szegedy, 2015), который нормализует слои активации предыдущего уровня в каждом блоке, то есть преобразовывает среднее значение активации, делая его близким к 0, а стандартное отклонение активации – близким к 1. MaxPool – слой "MaxPool2D" (Boureau, 2010), который уменьшает входной слой, выбирая максимальное значение пикселя в скользящем окне. Concat слой "Concatenation", который объединяет входные слои в один. Dense – полносвязный слой нейронов. Dropout – слой "Dropout" (Srivastava, 2014), который случайным образом устанавливает значения нейронных связей в 0 с заданной частотой на каждом шаге во время обучения нейронной сети, что помогает предотвратить переобучение. SoftMax – функция активации "Softmax", которая часто используется в качестве активации для последнего слоя нейросети с задачей классификации.

Для обучения нейронной сети в качестве функции потерь (loss) использовалась "categorical crossentropy" — категориальная кросс-энтропия, поскольку она наиболее эффективна, когда на выходе имеется более 2-х классов (Mueller, Guido, 2017). В качестве метрики использовалась "accuracy", в качестве оптимизатора — "Adam" (Kingma, Ba, 2015), который часто используется в подобных задачах. Результаты тестирования архитектур, представленных на рис. 3, с размером текстур 11 × 11 пикселей и полным набором параметров представлены в табл. 2.

Анализируя результаты тестирования, можно сделать вывод, что архитектура № 3, представленная на рис. 3, имеет наибольшую точность, соответствующую в первом приближении задаче определения маски льда. Эта архитектура была выбрана для дальнейших экспериментов.

После выбора архитектуры необходимо определиться с набором входных параметров. Чем меньше параметров подается на вход, тем быстрее работает в конечном итоге нейросеть. Для обна-

Таблица 2. Результаты тестирования на валидационной выборке

Архитектура	Loss	Accuracy
Архитектура № 1	0.38	0.86
Архитектура № 2	0.21	0.91
Архитектура № 3	0.15	0.95

Событие		Наблюдаемое событие				
		Наличие явления – Positive (P)	Отсутствие явления – Negative (N)			
Рассчитанное событие	Наличие явления — True (T)	Положительный — True positive (TP)	Ложный положительный – False positive (FP)			
	Отсутствие явления — False (F)	Ложный отрицательный — False negative (FN)	Отрицательный – True negative (TN)			

Таблица 3. Матрица ошибок

ружения снежного и ледяного покрова используются коротковолновые инфракрасные каналы в диапазоне длин волн от 1.4 до 1.8 мкм (Crane, Anderson, 1984; Salomonson, Appel, 2004). На приборе MCV-MP таким является 3 канал (табл. 1), поэтому его использование является необходимым для правильной работы нейронной сети.

Тестирование нейронной сети, при котором в качестве входных параметров подавался 3 канал с одним из других параметров, показало, что комбинация 2 и 3 каналов прибора МСУ-МР дает лучшую точность.

В дальнейшем было решено обучить нейронную сеть на комбинациях 2 и 3 каналов прибора MCУ-MP с различными вариантами комбинаций остальных параметров. Стоит отметить, что просто перестановка местами параметров не является новой комбинацией. В результате был произведен расчет около 500 различных моделей, проведено их сравнение с карт-схемами ледовой обстановки в акваториях морей, составленными в Дальневосточном центре НИЦ "Планета" в соответствии с международной номенклатурой ВМО по морскому льду (далее – эталонные карты).

Такое сопоставление было применено, поскольку оценка метриками машинного обучения иногда показывала высокую точность — более 90%, однако оказывалось, что из-за превалирующего влияния одного из параметров часть льда распознавалась как вода или наоборот. В результате была выбрана модель, которая обеспечивала наибольшее соответствие. Таким образом, был определен набор входных параметров: 2 и 3 каналы прибора MCУ-MP, зенитный угол спутника и Солнца, индекс NDVI.

Следующим шагом необходимо было определить оптимальный размер текстур. С этой целью были обучены нейронные сети с разными размерами текстур:  $17 \times 17$ ,  $15 \times 15$ ,  $13 \times 13$ ,  $11 \times 11$ ,  $9 \times 9$ ,  $7 \times 7$ ,  $5 \times 5$  и  $3 \times 3$  пикселей. Анализ метрик машинного обучения не дал достаточной информации о подходящем размере текстур, поскольку точность у всех тестируемых моделей была практически одинакова. В результате опять был применен метод сопоставления с эталонными картами и определен размер текстур –  $13 \times 13$  пиксе-

лей, с применением которого рассчитанная маска льда имела максимальную точность. Значения loss и accuracy для такого размера текстур и определенного выше набора параметров составили 0.13 и 0.96 соответственно.

#### ВАЛИДАЦИЯ

Для валидации работы полученного классификатора использовались данные прибора MODIS продукта MOD10 (Hall et al., 2001). Для расчета маски льда в этом алгоритме используются эмпирические пороговые значения для параметров температуры поверхности льда и индекса NDSI. Для корректного сравнения были подобраны данные КА Метеор-М № 2 и КА Aqua/Terra, близкие по времени пролета, с разницей не более 15 мин. расхожление по широте и лолготе которых составляло не более 5 градусов. Всего было отобрано 11 снимков за 2017-2019 гг., которые удовлетворяли этим условиям. Поскольку в данных МОD10 есть только один класс льда, то класс "лед под дымкой" разработанного классификатора принимался как "лед".

Для численной оценки рассчитывались коэффициенты, позволяющие оценить точность, вероятность ложного определения и т.д. При их расчете используется матрица ошибок (confusion matrix), представленная в табл. 3.

Формулы, по которым рассчитываются коэффициенты, представлены ниже:

$$Precision = TP/(TP + FP), \qquad (3)$$

Probability of false detection (POFD) =  
= 
$$FP/(FP + TN)$$
, (5)

$$F-measure = = 2(Precision \times POD)/(Precision + POD),$$
(6)

здесь Precision – точность, POD – вероятность правильного определения события, POFD – вероятность неправильного определения события,
F-measure – f-мера, или параметр, отражающий соотношение рассчитанных и эталонных данных.

Необходимо отметить, что для построения карт с использованием обученного нейросетевого классификатора по данным МСУ-МР используется маска облачного покрова (Андреев и др., 2014), разработанная ранее в Дальневосточном центре НИЦ "Планета", а в продукте MOD10 используется свой алгоритм по детектированию облачности. Поэтому сравнение полученных карт проводилось по двум вариантам: в первом использовались пиксели, в которых нет облачности как на MODIS, так и на MCУ-MP, во втором - вкоторых нет облачности только на МСУ-МР. Второй вариант использовался для оценки точности детектирования ледяного покрова по данным МСУ-МР на границах льда с водой и с облачностью, поскольку маски облачности MODIS и МСУ-МР отличаются. Результаты отражены в табл. 4.

Проводя анализ результатов из табл. 4, можно отметить, что если брать безоблачные пиксели на обоих приборах, то имеет место высокая точность 94.8%, а также низкая вероятность ложного детектирования 13.1%. Однако, если учитывать безоблачные пиксели только по MCУ-MP, то точность становится ниже, а вероятность ошибки выше. Для выяснения причин этого было проведено сравнение и подробный анализ валидации с эталонными картами.

Валидация с эталоном проводилась как для карт по данным MCV-MP, так и для карт по данным MODIS. Результат показан в табл. 5.

Примеры эталонных карт и карт по данным MCУ-MP, MODIS показаны на рис. 4.

Анализируя информацию, полученную из табл. 5 и рис. 4, можно сделать вывод, что разработанный классификатор обладает высокой точностью — 96.7%, имеет вероятность определения 97.1% и с вероятностью 11.1% классифицирует пиксели маски ледяного покрова ошибочно. Это означает, что из всех дешифрированных пикселей эталонных карт только 2.9% не были обнаружены, а 11.1% всех пикселей были ложно классифицированы. Карты MODIS хоть и имеют большую точность — 97.9%, но только 69.4% всех эталонных пикселей ледяного покрова было обнаружено, то есть продукт MOD10 имеет недобор в детектировании льда.

Анализируя информацию фрагмента 3 на рис. 4, видно, что маска льда по данным MODIS в некоторых местах имеет прямоугольную форму. В описании алгоритма MOD10 указано, что по краям ледяного покрова пиксели часто идентифицируются как облачные. Эти проблемные пиксели иногда занимают большие площади, в границах которых находится редкий или тонкий лед на краю ледяного массива. Эта проблема связана

Таблица 4. Валидация рассчитанных карт МСУ-МР по данным MODIS

Параметр	Первый вариант	Второй вариант
Precision	94.89	69.09
POD	98.78	98.82
F-measure	96.79	81.32
POFD	13.11	38.84

Таблица 5. Валидация карт МСУ-МР и MODIS по эталонным данным

Параметр	Сравнение с МСУ-МР	Сравнение с MODIS
Precision	96.71	97.99
POD	97.13	69.47
F-measure	96.92	81.30
POFD	11.10	3.60

с пороговой методикой детектирования облачности по MODIS.

Стоит отметить, что кроме более высокой вероятности детектирования льда, разработанный классификатор с достаточной точностью выделяет границы ниласовых форм льда, которые не выделяются в продукте MOD10 (рис. 4). Также, сравнивая фрагменты 3 и 4 на рис. 4, можно заметить, что область у правого берега о. Сахалин, где находится лед, имеющий более темные тона. на картах MODIS детектируется как облачность, а на картах МСУ-МР – как лед, что соответствует факту. Таким образом, разработанный нейросетевой классификатор оказался более чувствительным к распознаванию льда с наличием на нем подтаявшего снега, перемешанного с соленой морской водой, что является весомым фактором в пользу его применения в оперативной практике.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описан процесс получения рабочей методики определения маски льда по данным прибора MCУ-MP с использованием технологии сверточных нейронных сетей. Для обучения нейросети была создана выборка из 17 тысяч текстур, в которую входили данные MCУ-MP за период с 2017 по 2019 гг. Эмпирическим путем были выбраны оптимальные: архитектура сети, размер текстур и входные параметры.

Валидация по картам, полученным по данным прибора MODIS, показала точность 94.9% и вероятность ложного обнаружения 13.1%. Валидация по эталонным картам показала точность 96.7% и вероятность ложного обнаружения 11.1%.

**Рис. 4.** Участок Охотского моря: *1* – исходное изображение по данным MODIS; *2*) исходное изображение по данным MCУ-MP; *3* – маска ледяного покрова по данным прибора MODIS (желтый – лед, синий – вода, зеленый – земля, серый – облачность); *4* – маска ледяного покрова по данным прибора MCV-MP (желтый – лед, оранжевый – лед под дымкой, синий – вода, зеленый – земля, серый – облачность); *5* – эталонная маска ледяного покрова (желтый – лед, зеленый – земля, серый – облачность); *5* – эталонная маска ледяного покрова (желтый – лед, зеленый – лед, зеленый – земля, серый – облачность).

Полученный нейросетевой классификатор может быть внедрен в оперативную работу специалистов для автоматизации начального этапа детектирования ледяного покрова, связанного с выделением кромки льда.

Проведенная работа является заделом для дальнейших работ по созданию тематических продуктов: возрастные характеристики, сплоченность и толщина льда.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев А.И., Лотарева З.Н., Бородицкая А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ "PlanetaMeteorTexMaker" № 2018665185 // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 3 декабря 2018 г.

Андреев А.И., Шамилова Ю.А., Холодов Е.И. Применение сверточной нейронной сети для детектирования облачности по данным прибора МСУ-МР спутника "Метеор-М" № 2 // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 44–53. Акимов Н.П., Бадаев К.В., Гектин Ю.М., Рыжаков А.В., Смелянский М.Б., Фролов А.Г. Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР для космического информационного комплекса "Метеор-М". Принцип работы, эволюция, перспективы // Ракетнокосмическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2. Вып. 4. С. 30–39. https://doi.org/10.17238/issn2409-0239.2015.4.30

2

Бондур В.Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16. https://doi.org/10.7868/S0205961414010035

Бондур В.Г., Старченков С.А. Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.

Блощинский В.Д., Кучма М.О., Андреев А.И. Применение сверточных нейронных сетей в задачах детектирования облачности и снежного покрова по данным прибора МСУ-ГС КА Электро-Л № 2 // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва: ИКИ РАН, 2019. С. 18.

Крамарева Л.С., Андреев А.И., Блощинский В.Д., Кучма М.О., Давиденко А.Н., Пустатинцев И.Н., Шамилова Ю.А., Холодов Е.И., Королев С.П. Использование нейронных сетей в задачах гидрометеорологии // Вычислительные технологии. 2019а. Т. 24. № 6. С. 50–59. https://doi.org/10.25743/ICT.2019.24.6.007

Крамарева Л.С., Андреев А.И., Симоненко Е.В., Сорокин А.А. Применение сверточной нейронной сети для детектирования снега по данным многоканального спутникового устройства космического аппарата "Метеор-М" № 2 // Procedia Computer Science. 2019б. V. 150. P. 368–

375.

Крамарева Л.С., Пустынский И.С., Филей А.А., Андреев А.И., Кучма М.О., Блощинский В.Д. Современные возможности и подходы Дальневосточного центра НИЦ "Планета" к решению научных и прикладных задач с использованием данных дистанционного зондирования (50 лет в области ДЗЗ) // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва: ИКИ РАН, 2019в. С. 5.

*Паундер. Э.* Физика льда / Пер. с англ. М.: Мир, 1967. 190 с.

*Смирнов В.Г.* Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Под ред. В.Г. Смирнова. С.-П. ААНИИ, 2011. 240 с.

Топоров А.И., Мясоедов А.Г., Гусев В.В. Использование нейросетевых подходов для мультиспектрального анализа спутниковых данных при проектировании объектов капитального строительства // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва: ИКИ РАН, 2019. С. 67.

*Тренина И.С.* Космический мониторинг ледяного покрова для оперативного картирования и долговременных исследований // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2004. Т. 1. № 1. С. 303–316.

*Baker N.* Joint Polar Satellite System (JPSS) VIIRS Sea Ice Characterization Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) // NASA Goddard Space Flight Center: Greenbelt. MD. USA. 2011.

Bloshchinskiy V.D., Kuchma M.O., Andreev A.I., Sorokin A.A. Snow and cloud detection using a convolutional neural network and low-resolution data from the Electro-L No. 2 Satellite // J. Appl. Remote Sens. 2020. V. 14. № 3. 034506. https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.034506

*Boureau Y., Ponce J., LeCun Y.* A theoretical analysis of feature pooling in visual recognition // 27th Int. Conf. Mach. Learn. (ICML'10). Madison: Omnipress, 2010. P. 111–118.

*Crane R. G., Anderson M. R.* Satellite discrimination of snow/cloud surfaces // International J. Remote Sensing. 1984. № 5. P. 213–223.

https://doi.org/10.1080/01431168408948799

*Dorsey N.E.* Properties of ordinary water-substance // Amer. Chem. Soc. Monogr. Ser. 1940. № 81. P. 673. https://doi.org/10.1002/qj.49708134736

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 2 2021

*Ioffe S., Szegedy C.* Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. 2015. Arxiv:1502.03167.

Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V., Barton J.S., Casey K., Chien J.Y.L., DiGirolamo N.E., Klein A.G., Powell H.W., Tait A.B. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms // NASA Goddard Space Flight Center: Greenbelt. MD. USA. 2001. V. 45.

*Jay Kuo C.C.* Understanding convolutional neural networks with a mathematical model // J. Vis. Commun. Image Represent. 2016. Vol. 41. P. 406–413. arXiv:1609.04112.

Jezek K.C., Perovich D., Golden K.M., Luther C., Barber D., Gogineni P., Grenfell T., Jordan A., Mobley C., Nghiem S.V., Onstott R. A broad spectral, interdisciplinary investigation of the electromagnetic properties of sea ice // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1998. V. 36.  $\mathbb{N}$  5. P. 1633–1641. https://doi.org/10.1109/36.718635

Jin D., Chung S.R., Lee K.S., Seo M., Choi S., Seong N.H., Jung D., Sim S., Kim J., Han K.S. Development of Geo-KOMPSAT-2A Algorithm for Sea-Ice Detection Using Himawari-8/AHI Data // Remote Sens. 2020. V. 12. P. 2262. https://doi.org/10.3390/rs12142262

*Key J.R., Mahoney R., Liu Y., Romanov P., Tschudi M., Appel I., Maslanik J., Baldwin D., Wang X., Meade P.* Snow and ice products from Suomi NPP VIIRS // J. Geophys. Res.: Atmos. 2013. P. 118. https://doi.org/10.1002/2013JD020459

*Kingma D.P., Ba J.L.* Adam: a method for stochastic optimization. 2015. Arxiv:1412.6980.

*Meier W.N., Markus T., Comiso J., Ivano A., Miller J.* AMSR2 Sea Ice Algorithm Theoretical Basis Document // NASA Goddard Space Flight Center: Greenbelt. MD. USA. 2017.

*Minnett P.J.* GHRSST-PP Sea Ice Working Group (SI-WG) report // 8th GHRSST-PP Science Team Meeting. 14–18 May 2007. Melbourne, Australia, 2007. Vol. 1. P. 36–39.

*Mueller A., Guido S.* An Introduction to Machine Learning with Python. O'Reilly Media, Inc., 2017. P. 402.

Salomonson V. V., Appel I. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index // Remote Sensing of Environment. 2004. № 89. P. 351–360. https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.016

*Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Sa-lakhutdinov R.* Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting // J. Mach. Learn. Res. 2014. V. 15. P. 1929–1958.

Zang L., Zang L., Du B. Deep learning for remote sensing data: a technical tutorial on the state of the art // IEEE Geosci. Remote Sens. Mag. 2016. V. 4. № 2. P. 22–40. https://doi.org/10.1109/MGRS.2016.2540798

# Ice Cover Detection of the Far Eastern Seas Using the MSU-MR Instrument of the Meteor-M No. 2 Satellite

## M. O. Kuchma<sup>1</sup>, Z. N. Lotareva<sup>1</sup>, and L. A. Slesarenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta", Khabarovsk, Russia

In this paper the technology for determining the boundaries of the sea ice cover using a convolutional neural network in relation to the data of a low-resolution multispectral scanning device installed on the Russian satellite "Meteor-M" No. 2 is considered. The paper describes the selection criteria for the parameters involved in training the neural network, as well as the process of texture size determination. The classification score of the developed model was determined using machine learning metrics. The validation results showed that the obtained algorithm has an probability of detection 94.9 and 96.7% in comparison with the maps of the ice cover boundaries from MOD10 product of the MODIS instrument and archived maps of ice conditions, built in accordance with the WMO international nomenclature for sea ice.

Keywords: remote sensing, MSU-MR, convolutional neural network, texture, ice, sea ice cover

#### REFERENCES

Andreev A.I., Lotareva Z.N., Boroditskaya A.V. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM "PlanetaMeteorTexMaker" № 2018665185 [Certificate of state registration of the computer program "PlanetaMeteorTexMaker" No. 2018665185] // Zaregistrirovano v Reestre programm dlya EVM 3 December 2018 (In Russian). Andreev A.I., Shamilova Yu.A., Holodov E.I. Primenenie svertochnoy neyronnoy seti dlya detektirovaniya oblachnosti po dannym pribora MSU-MR sputnik "Meteor-M" Nº 2 [Application of a convolutional neural network for cloud detection according to the MSU-MR device of the Meteor-M satellite No. 2] // Meteorologiya i gidrologiya. 2019. № 7. P. 44–53 (In Russian).

Akimov N.P., Badaev K.V., Gektin YU.M., Ryzhakov A.V., Smelyanskiy M.B., Frolov A.G. Mnogozonal'noe skaniruyuschee ustroystvo malogo razresheniya MSU-MR dlya kosmicheskogo informatsionnogo kompleksa "Meteor-M". Printsip raboty, evolyutsiya, perspektivy [Miltiband scanner of low spatial resolution MSU-MR for space-based informational system "Meter-M". The principle of operation and development prospects] // Raketno-Kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy. 2015. T. 2. V. 4. P. 30–39. DOI: 10.17238/issn2409-0239.2015.4.30

*Baker N.* Joint Polar Satellite System (JPSS) VIIRS Sea Ice Characterization Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) // NASA Goddard Space Flight Center: Greenbelt. MD. USA. 2011.

Bloschinskiy V.D., Kuchma M.O., Andreev A.I. Primenenie svertochnyh neyronnyh setey v zadachah detektirovaniya oblachnosti i snezhnogo pokrova po dannym pribora MSU-GS KA Elektro-L № 2 [Application of convolutional neural networks in the problems of detecting clouds and snow cover according to the data of the MSU-GS device of the Electro-L № 2 satellite] // Materialy 17-y Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii"Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa". Moskva: IKI RAN, 2019. P. 18 (In Russian).

Bloshchinskiy V.D., Kuchma M.O., Andreev A.I., Sorokin A.A. Snow and cloud detection using a convolutional neural network and low-resolution data from the Electro-L No. 2 Satellite // J. Appl. Remote Sens. 2020. V. 14. № 3. 034506. DOI: 10.1117/1.JRS.14.034506 Bondur V.G. Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows // Izv., Atmos. Oceanic Phys., 2014. V. 50. № 9. P. 840–852. DOI: 10.1134/S0001433814090060

*Bondur V.G., Starchenkov S.A.* Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskih izobrazheniy (Methods and programs for aerospace imagery processing and classification) // Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography. 2001. № 3. P. 118–143 (In Russian).

Boureau Y., Ponce J., LeCun Y. A theoretical analysis of feature pooling in visual recognition // 27th Int. Conf. Mach. Learn. (ICML'10). Madison: Omnipress, 2010. P. 111–118. Crane R.G., Anderson M.R. Satellite discrimination of snow/cloud surfaces // International J. of Remote Sensing. 1984.  $\mathbb{N}$  5. P. 213–223. DOI: 10.1080/01431168408948799 Dorsey N.E. Properties of ordinary water-substance // Amer. Chem. Soc. Monogr. Ser. 1940.  $\mathbb{N}$  81. P. 673. DOI: 10.1002/qj.49708134736

*Ioffe S., Szegedy C.* Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. 2015. Arxiv:1502.03167.

Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V., Barton J.S., Casey K., Chien J.Y.L., DiGirolamo N.E., Klein A.G., Powell H.W., Tait A.B. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms // NASA Goddard Space Flight Center: Greenbelt. MD. USA. 2001. V. 45.

*Jay Kuo C.C.* Understanding convolutional neural networks with a mathematical model // J. Vis. Commun. Image Represent. 2016. V. 41. P. 406–413. arXiv:1609.04112.

Jezek K.C., Perovich D., Golden K.M., Luther C., Barber D., Gogineni P., Grenfell T., Jordan A., Mobley C., Nghiem S.V., Onstott R. A broad spectral, interdisciplinary investigation of the electromagnetic properties of sea ice // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1998. V. 36. № 5. P. 1633–1641. DOI: 10.1109/36.718635

Jin D., Chung S.R., Lee K.S., Seo M., Choi S., Seong N.H., Jung D., Sim S., Kim J., Han K.S. Development of Geo-KOMPSAT-2A Algorithm for Sea-Ice Detection Using Himawari-8/AHI Data // Remote Sens. 2020. V. 12. P. 2262. DOI: 10.3390/rs12142262

Key J.R., Mahoney R., Liu Y., Romanov P., Tschudi M., Appel I., Maslanik J., Baldwin D., Wang X., Meade P. Snow and

ice products from Suomi NPP VIIRS // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. 118. DOI: 10.1002/2013JD020459

*Kingma D.P., Ba J.L.* Adam: a method for stochastic optimization. 2015. Arxiv:1412.6980.

*Meier W.N., Markus T., Comiso J., Ivano A., Miller J.* AMSR2 Sea Ice Algorithm Theoretical Basis Document // NASA Goddard Space Flight Center: Greenbelt. MD. USA. 2017.

Kramareva L.S., Andreev A.I., Bloschinskiy V.D., Kuchma M.O., Davidenko A.N., Pustatintsev I.N., Shamilova Yu.A., Holodov E.I., Korolev S.P. Ispol'zovanie neyronnyh setey v zadachah gidrometeorologii [The use of neural networks in hydrometeorology problems] // Computational Technologies. 2019a. V. 24. № 6. P. 50–59 (In Russian). DOI: 10.25743/ICT.2019.24.6.007

Kramareva L.S., Andreev A.I., Simonenko E.V., Sorokin A.A. Primenenie svertochnoy neyronnoy seti dlya detektirovaniya snega po dannym mnogokanal'nogo sputnikovogo ustroystva kosmicheskogo apparata "Meteor-M"  $\mathbb{N} \ 2$  [Application of a convolutional neural network for snow detection based on data from a multichannel device of the Meteor-M No. 2 satellite] // Procedia Computer Science. 2019b. V. 150. P. 368–375 (In Russian).

Kramareva L.S., Pustynskiy I.S., Filey A.A., Andreev A.I., Kuchma M.O., Bloschinskiy V.D. Sovremennye vozmozhnosti i podhody Dal'nevostochnogo tsentra NITS "Planeta" k resheniyu nauchnyh i prikladnyh zadach s ispol'zovaniem dannyh distantsionnogo zondirovaniya (50 let v oblasti DZZ) [Modern possibilities and approaches of the Far Eastern Center of State Research Center "Planeta" to solving scientific and applied problems using remote sensing data (50 years in the field of remote sensing)] // Materialy 17-y Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa". Moskva: IKI RAN, 2019c. P. 5 (In Russian).

*Minnett P.J.* GHRSST-PP Sea Ice Working Group (SI-WG) report // 8th GHRSST-PP Science Team Meeting. 14–18 May 2007. Melbourne, Australia, 2007. V. 1. P. 36–39.

*Mueller A., Guido S.* An Introduction to Machine Learning with Python. O'Reilly Media, Inc., 2017. P. 402.

*Paunder E.* Fizika l'da [Physics of Ice] / Per. s angl. M.: Mir, 1967. P. 190 (In Russian).

Salomonson V.V., Appel I. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index // Remote Sensing of Environment. 2004. № 89. P. 351–360. DOI: 10.1016/j.rse.2003.10.016.

*Smirnov V.G.* Sputnikovye metody opredeleniya harakteristik ledyanogo pokrova morey [Satellite Methods for Determining the Characteristics of the Ice Cover of the Seas] / Ed. V.G. Smirnova. SPb.: AANII, 2011. 240 p. (In Russian).

Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting // J. Mach. Learn. Res. 2014. V. 15. P. 1929–1958.

*Toporov A.I., Myasoedov A.G., Gusev V.V.* Ispol'zovanie neyrosetevyh podhodov dlya mul'tispektral'nogo analiza sputnikovyh dannyh pri proektirovanii ob''ektov kapital'nogo stroitel'stva [The use of neural network approaches for multispectral analysis of satellite data in the design of capital construction facilities] // Materialy 17-y Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa". Moskva: IKI RAN, 2019. P. 67 (In Russian).

*Trenina I.S.* Kosmicheskiy monitoring ledyanogo pokrova dlya operativnogo kartirovaniya i dolgovremennyh issledovaniy [Space monitoring of ice cover for operational mapping and long-term research] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2004. T. 1.  $\mathbb{N}$  1. P. 303–316 (In Russian).

Zang L., Zang L., Du B. Deep learning for remote sensing data: a technical tutorial on the state of the art // IEEE Geosci. Remote Sens. Mag. 2016. V. 4. № 2. P. 22–40. DOI: 10.1109/MGRS.2016.2540798

# \_\_\_\_\_ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ \_\_\_\_\_ Космической информации

# ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ОБЛАЧНОСТИ ПО ДАННЫМ КА HIMAWARI-8 С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

© 2021 г. А. И. Андреев<sup>а, b,</sup> \*, Ю. А. Шамилова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Дальневосточный центр ФГБУ "Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета", Хабаровск, Россия

<sup>b</sup>Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия \*E-mail: a.andreev@dvrcpod.ru

Поступила в редакцию 28.07.2020 г.

Работа посвящена методике детектирования облачности по данным геостационарного космического аппарата Himawari-8 с применением нейронной сети сверточного типа. Разработанная модель классификатора облачности была протестирована в различных сценариях, включая зимний и летний периоды года в ночное и дневное время суток, а также в моменты смены дня и ночи. По результатам тестирования было выявлено, что даже в сложных сценариях разработанный классификатор допускает минимальное количество ошибок в сравнении с применяемыми в мировой оперативной практике алгоритмами детектирования облачности.

*Ключевые слова*: нейронная сеть, маска облачности, детектирование облачности, CNN, классификация мультиспектральных изображений, Himawari-8

DOI: 10.31857/S0205961421010036

#### введение

Оперативность получения информации и относительно высокое пространственное разрешение позволяют рассматривать геостационарные спутники в качестве основного инструмента глобального мониторинга состояния окружающей среды, климата и атмосферы. Приборы, устанавливаемые на геостационарные космические аппараты (КА), позволяют производить съемку в широком диапазоне длин волн от видимого до длинноволнового инфракрасного излучения, что позволяет решать с их помощью широкий круг задач, связанных с определением опасных метеорологических явлений, мониторингом вулканической активности, обнаружением очагов возгораний и др. Эти и многие другие задачи подразумевают использование маски облачности, к которой выдвигается ряд требований. Расчет маски должен выполняться за время, достаточное для работы в оперативном режиме с учетом высокой частоты съемки; маска должна рассчитываться для различных климатических условий. Кроме того, некоторые задачи, например мониторинг лесных пожаров или анализ облачных образований, предполагают расчет маски не только в дневное, но и в ночное время суток.

Исходя из решаемых в настоящее время в Дальневосточном центре НИЦ "Планета" задач, возникает потребность в создании маски облачности, учитывающей выше обозначенные требо-

вания. В данной работе предлагается реализация алгоритма детектирования облачности в дневное и ночное время суток, специально разработанного для его применения к данным геостационарных КА на примере спутника Himawari-8. Используемый в работе подход основан на применении текстурного нейросетевого классификатора сверточного типа (LeCun, Bengio, 1995). Классификатор использует спектральные и пространственные (текстурные) признаки, что позволяет извлечь практически максимальный объем полезной для детектирования облачности информации из спутниковых изображений. Метод классификации основывается на опыте ранее проведенных исследований в данной области (Ganci et al., 2011; Drönner et al., 2018; Mahajan, Fataniya, 2019; Андреев и др., 2019) и оптимизирован для более высокой скорости обработки данных при минимальных потерях в качестве классификации, что позволяет использовать его в оперативной работе для геостационарных КА с высокой частотой съемки.

#### МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ОБЛАЧНОСТИ

Быстрое и точное детектирование облачности при всем разнообразии внешних факторов представляет собой непростую задачу, и несмотря на то, что за последние несколько десятков лет были представлены различные методики для ее обнаружения, разработка более сложных и точных методов продолжается и в настоящее время (Mahajan, Fataniya, 2019). На сегодняшний день можно условно выделить несколько подходов: методы на основе пороговых значений, статистические методы, а также подходы на основе машинного обучения и нейронных сетей (Sun et al., 2016).

Подход на основе пороговых значений является наиболее распространенным, в его основе лежит спектральный анализ подстилающей поверхности и облачности в каждом пикселе изображения. Пороговые алгоритмы отличаются простотой реализации и небольшой вычислительной сложностью, а результаты классификации легко поддаются физическому обоснованию. Тем не менее, качество работы данных алгоритмов в значительной степени зависит от точности подбора пороговых коэффициентов. Процесс подбора этих коэффициентов является весьма трудоемким для территорий с различными климатическими условиями. Кроме того, в сложных сценах, где присутствует снег или оптически тонкая перистая облачность, качество классификации значительно снижается из-за схожести спектральных характеристик снега и облачности, содержащей кристаллы льда (Chen et al., 2018; Stillinger et al., 2019), а также из-за спектральных искажений, возникающих при прохождении излучения сквозь облачность.

Применение моделей переноса излучения (Radiative Transfer Model) позволило усовершенствовать пороговые алгоритмы. Моделирование всевозможных коэффициентов спектральной яркости при самых различных комбинациях параметров, таких как зенитные углы Солнца и спутника, содержание аэрозолей в атмосфере и др., позволяет существенно повысить точность подбора пороговых значений (Imai, Yoshida, 2016). Метод является высокоэффективным, особенно при его комбинировании с нейросетевыми алгоритмами (Chen et al., 2018), однако на данный момент обладает существенным ограничением - симуляция значений отражающей способности на верхней границе атмосферы производится только для пикселей, но не для текстур. Вследствие этого текстурная информация о подстилающей поверхности и облачности становится недоступной.

Статистические методы детектирования облачности базируются на уравнениях регрессии, полученных с использованием статистического анализа значений спектральных характеристик отражающей способности и яркостной температуры среди облачных и безоблачных пикселей. На практике данные методы чаще всего используются для предварительного анализа данных и обладают теми же недостатками, которые свойственны пороговым методикам — низкая эффективность разделения снега и облачности, а также ошибки при детектировании оптически тонкой облачности. Несмотря на это, данный подход может выступать в качестве основы для построения классификатора облачности (Amato et al., 2008).

Построение классификаторов на основе алгоритмов машинного обучения также является распространенным подходом в задаче детектирования облачности. Данный подход представляет собой автоматизированный подбор пороговых значений на основе статистических данных с использованием наборов признаков каждого классифицируемого объекта, что позволяет сочетать достоинства вышеописанных методик. Частным случаем алгоритмов машинного обучения являются нейронные сети. Практика показывает, что нейросетевой подход в сочетании с текстурными и спектральными признаками показывает наибольшую точность в задаче детектирования облачности (Drönner et al., 2018; Mahajan, Fataniya, 2019).

Предлагаемый в данной работе метод детектирования облачности основан на применении нейронной сети сверточного типа, архитектура которой оптимизирована для быстрой обработки спутниковых изображений геостационарных КА. В общем случае метод является универсальным для спутниковых приборов малого разрешения и может быть применен как к геостационарным, так и к полярно орбитальным КА. Как и любой другой метод, базирующийся на алгоритмах машинного обучения, модель классификатора на основе сверточной нейронной сети необходимо обучить на предварительно сформированных данных.

#### ФОРМИРОВАНИЕ НАБОРОВ ДАННЫХ

Первоочередным этапом в разработке алгоритма классификации является сбор, маркировка в соответствии с принадлежностью к одному из классов и предварительная обработка обучающих и тестовых данных необходимого объема. Необходимым будем считать объем выборки такой, что при его увеличении в 2 раза, общий уровень точности классификации меняется незначительно (менее 1%) при соблюдении условия пропорциональности объемов тестовой и обучающей выборки (в работе принято приблизительное соотношение объемов 1 : 4 соответственно). Отметим также, что обучающая выборка не может содержать образцы из тестовой выборки за одинаковое время съемки спутниковым прибором. В работе использовались мультиспектральные изображения по данным прибора AHI (Advanced Himawari Imager), установленного на геостационарный КА Himawari-8 (Da, 2015). Данные охватывают временной промежуток с января 2016 г. по июль 2019 г. в количестве 302 изображений по территории Азиатско-Тихоокеанского региона (30°-65° с.ш и 105°-180° в.д.).

Для решения задачи детектирования облачности используются спектральные каналы, ранее успешно применявшиеся в работах других авторов (Wang et al., 2019; Afzali Gorooh et al., 2020) и показавшие свою эффективность в аналогичных задачах. В их число входят каналы видимого и ИК диапазонов длин волн, приведенные к пространственному разрешению 2 км: 0.64, 0.86, 1.6, 2.3, 3.9, 6.9, 7.3, 8.6, 11.2 и 12.4 мкм, из которых в дальнейшем формировалась обучающая выборка.

Каждый образец из выборки представляет собой тензор третьего порядка  $X_{i,j,k}$ , где индексы *i* и *j* соответствуют строке и столбцу изображения, k – номеру спектрального канала прибора. Каждому образцу была поставлена в соответствие метка класса  $\{0, 1\}$  в зависимости от принадлежности центрального пикселя  $p(i_c, j_c)$  ( $i_c = T/2, j_c = T/2, k = 1...C$ ) к облачности или безоблачной подстилающей поверхности соответственно, где T – размер текстуры, C – количество спектральных каналов,  $i_c$  и  $j_c$  – координаты центра текстуры. Центральный пиксель может находиться не только в центре рассматриваемого объекта, но и на границе двух и более классов (при условии, что эта граница визуально хорошо различима).

Скорость работы алгоритма классификации в значительной степени зависит от размера текстур, поэтому для наиболее оптимального использования вычислительных ресурсов в данной работе размер текстур T был принят равным 5 пикселям. В работе (Ganci et al., 2011) данный размер ранее успешно применялся для задачи детектирования облачности по данным прибора SEVIRI. Кроме того, как выяснится в дальнейшем, меньший размер текстур способствует повышению детализации результирующей маски облачности в сравнении с результатами предыдущего исследования (Андреев и др., 2019), где использовался размер, равный 32 пикселям.

Формирование обучающих наборов данных происходило последовательным образом. На первом этапе формирования обучающей выборки производилась ручная классификация точек на спутниковых изображениях опытными специалистами-дешифровщиками с использованием RGB синтеза спектральных каналов 0.64, 0.86 и 1.6 мкм для дневного времени суток и 3.9, 11 и 12 мкм для ночного. Классифицируемые точки общим количеством 5 тыс. примеров включали образцы снега, льда, водной поверхности, почвы и различных типов облачности. В дальнейшем эти точки становились центрами текстур, которые использовались для обучения алгоритма. После предварительного обучения происходила пробная классификация на новых тестовых изображениях, ранее не встречавшихся в обучающей или тестовой выборке. Результаты классификации подвергались анализу, в процессе которого выявлялись ошибки. Затем для этих тестовых изображений производилась повторная разметка данных в областях присутствия ошибок, и новые размеченные данные добавлялись в обучающую и тестовую выборки, после чего происходило повторное обучение алгоритма. Этот рекурсивный процесс продолжался до тех пор, пока количество ошибок классификации не было сведено до минимального значения (в данной работе эта процедура повторялась до 10 раз). Данный подход позволяет снизить объем используемых в обучении данных и сосредоточить внимание на проблемных случаях классификации, внося коррективы в процесс сбора данных. По итогам этой работы общий объем данных составил приблизительно 62 тыс. образцов текстур.

Для увеличения количества обучающих текстур производилась их аугментация за счет поворотов вокруг центра каждые 90 градусов и отражений по горизонтали, что позволило увеличить объем исходной выборки до 495 тыс.

Текстурные данные, полученные в дневное и ночное время, объединялись в одну выборку и подвергались предварительной обработке. Значения отражающей способности на верхней границе атмосферы нормализовались по зенитному углу Солнца:

$$Ref_{corr} = \frac{Ref}{\cos SZA}$$

где  $Ref_{corr}$  — скорректированное значение отражающей способности, Ref — исходное значение отражающей способности, SZA — значение зенитного угла Солнца в пикселе. Затем каждый спектральный канал нормализовался в интервале от 0 до 1. Значения отражающей способности при зенитных углах Солнца более 85° приравнивались к нулю. Данное значение зенитного угла было выбрано, исходя из результатов работы (Godin, 2014), где также решалась проблема совмещения "дневной" и "ночной" маски облачности. Сформированные таким образом данные в дальнейшем использовались для обучения и тестирования алгоритма классификации.

#### АЛГОРИТМ КЛАССИФИКАЦИИ

Основу алгоритма классификации составляет нейронная сеть сверточного типа, ранее успешно применявшаяся для задачи распознавания объектов на спутниковых изображениях (Francis et al., 2019). Алгоритм работы сверточных нейронных сетей в задаче классификации заключается в последовательном преобразовании тензора исходного изображения (текстуры) при помощи операции свертки матричными ядрами к выходному вектору, в котором закодирован один из возможных классов. Коэффициенты матричных ядер подбираются автоматически в процессе обучения, кодируя определенные признаки изображения (прямые линии, сетки, углы и др.). При прохождении скользящего окна над определенной областью изображения и применении операции свертки формируется отклик в форме значения вероятности того, что определенный признак присутствует в этой области. Комбинация таких признаков служит индикатором для определенного класса текстуры (например, снег в горах). Кроме того, значительную долю информации также несут значения используемых признаков (яркостная температура, коэффициенты спектральной яркости).

Разработанная в данной работе модель нейронной сети MetNet3 является дальнейшим развитием архитектуры, представленной в работах (Kramareva et al., 2019) и (Андреев и др., 2019). Для указанной архитектуры был сделан ряд улучшений, направленных на снижение ее вычислительной сложности при незначительном ухудшении точности классификации (не более 1.5%) с учетом результатов недавних исследований в данной области (Szegedy et al., 2016). Одним из таких улучшений является переход к полносверточной архитектуре путем замены полносвязных выходных нейронных слоев на комбинацию сверточных слоев, что позволило снизить вычислительную сложность. Другим архитектурным решением является внедрение промежуточных связей между слоями с целью извлечения текстурных признаков на различных масштабах и снижения явления переобучения модели. В дальнейшем две ветви архитектуры, имеющие выходные тензоры А и В, объединяются в единый тензор С за счет опера-элементов тензора B в конец тензора A):

$$C_{ijk} = A_{ijm} \oplus B_{ijn},$$

где *i*, *j*, *k*, *m*, *n* – индексы тензоров, k = m + n. Подобный подход в архитектуре был успешно опробован в работах (Drönner et al., 2018; Mateo-García et al., 2019) по детектированию облачности методом сегментации всего мультиспектрального изображения по данным геостационарных спутников, что в общем случае схоже с подходом, применяемым в настоящей работе, где классификация выполняется по методу скользящего окна для каждого пикселя отдельно.

Перед началом процесса обучения из обучающего набора данных выделялась небольшая (размером 15% от исходного набора данных) валидационная выборка, предназначенная для оценки алгоритма в процессе обучения и корректировки его параметров. В итоговой оценке результатов классификации данный набор впоследствии не использовался.

Процедура обучения нейронной сети осуществлялась с использованием алгоритма "Adam" (Kingma, Ba, 2014), для которого был установлен стандартный коэффициент скорости обучения (learning rate), равный 10<sup>-4</sup>. В качестве целевой функции потерь использовалась формула кросс-энтропии для случая бинарной классификации (Sadowski, 2016). В рассматриваемой задаче при указанных параметрах обучения модель классификации сходится спустя приблизительно 400 итераций обучающего алгоритма (характер сходимости экспоненциальный).

Алгоритм реализации модели классификатора разрабатывался на языке программирования Руthon 3.7 с использованием модулей для работы с нейронными сетями TensorFlow 1.14 и Keras 2.2.4. Максимальное время расчета маски облачности размером 2300 × 7500 пикселей (регион с 30° с.ш. 65° в.д. по 75° с.ш. 200° в.д.) занимает до четырех минут на следующей аппаратной конфигурации: центральный процессор Intel Core i7-5820K, графический процессор NVIDIA GTX 1060, оперативная память процессора и видеокарты – 16 и 3 Гб соответственно. Таким образом, указанное время расчета позволяет применять данный классификатор в оперативном режиме на данном оборудовании.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оценка качества масок облачности, полученных представленным в данной работе классификатором, выполнялась с использованием валидационного набора данных, как это принято в задачах машинного обучения, а также путем сравнения с результатами работы алгоритмов для детектирования облачности, применяемых в мировой оперативной практике. В качестве оценочных метрик использовались точность (Precison), полнота (Recall), а также показатель F1-меры, являющийся гармоническим средним точности и полноты (Friedman et al., 2001):

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP},$$
(1)

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN},$$
(2)

$$F1 = 2 \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} = \frac{2TP}{2TP + FP + FN},$$
 (3)

гле:

• *TP* (True Positive) — количество примеров, где облачность присутствует на рассматриваемом примере и на эталоне;

• *FP* (False Positive) — количество примеров, где облачность присутствует на рассматриваемом примере, но отсутствует на эталоне;

• *FN* (False Negative) – количество примеров, где облачность отсутствует на рассматриваемом примере, но присутствует на эталоне.

Валидационная выборка для дневного и ночного времени суток включала в себя около 14 тыс. примеров облачных и безоблачных текстур. В процессе формирования этой выборки использовались 76 сроков наблюдений с января 2016 г.

Время суток	Точность, %	Полнота, %	F1, %
Дневное	96.14	97.86	96.99
Ночное	98.87	98.59	98.73

**Таблица 1.** Результаты оценки точности классификации для валидационного набора данных

по июль 2019 г. Следуя формулам (1), (2) и (3), для валидационной выборки были получены результаты, представленные в табл. 1.

Указанные в табл. 1 результаты свидетельствуют о высокой обобщающей способности рассматриваемого классификатора, поскольку данные валидационной выборки не содержатся в данных обучающей выборки. Чуть более высокая точность классификации в ночное время суток обусловлена несколько менее репрезентативной выборкой текстур. Это вызвано тем, что ручная классификация только по данным ИК каналов является значительно более трудоемким процессом, так как зачастую встречаются ситуации, в которых проблематично однозначно выделить наличие или отсутствие облачности в рассматриваемом пикселе. При недоступности вспомогательной информации, например данных наземных станций, подобные случаи не включались в обучающие и тестовые наборы данных.

Для более комплексной оценки классификатора был также рассмотрен другой подход. Основная идея этого подхода заключается в попиксельном сравнении масок облачности с "эталонными", получаемыми с использованием известных действующих алгоритмов. В данной работе в качестве "эталона" был выбран продукт NOAA JPSS GRAN, содержащий бинарную маску облачности по данным прибора VIIRS KA NOAA-20 (https://www.bou.class.noaa.gov). Данная маска облачности формируется алгоритмом, основанным на серии пороговых тестов, подробно описанных в работе (Godin, 2014). Данный алгоритм учитывает тип подстилающей поверхности. данные о скорости и направлении ветра вблизи морской поверхности, содержание воды в столбе атмосферы и температуру воздуха в приземном слое.

Из-за наличия ошибок, наблюдаемых в масках облачности по данным прибора VIIRS, в зимнее время года в качестве эталона использована маска облачности из продукта 2B-CLDCLASS-LIDAR (http://www.cloudsat.cira.colostate.edu), формируемого по данным KA CloudSat и CALIPSO. Данная маска облачности представляет собой трек шириной в 1 пиксель (приблизительно 1.4 км) (Sassen, 2008), вдоль которого производится вертикальное зондирование атмосферы с целью обнаружения облачности и ее последующей классификации. Применяемый для обработки этих данных пороговый алгоритм использует данные о высоте, температуре, отражающей способности и оптической толщине облачности.

В сравнении масок использовались данные прибора VIIRS с 1 по 5 августа 2019 г. и с 1 по 5 февраля 2020 г., данные CloudSat и CALIPSO с 1 по 8 февраля 2017 г. Максимальная разность по времени съемки между "эталонными" приборами (VIIRS, CloudSat, CALIPSO) и AHI составляет не более 5 мин. На масках облачности в местах их пересечений вырезались полигоны общим количеством 32 шт., примеры которых изображены на рис. 4–8. Полигоны распределены по всей территории Азиатско-Тихоокеанского региона. В табл. 2 приведены усредненные результаты валидации для различных сценариев.

Результаты оценки точности показали несколько более высокий результат по данным CloudSat в сравнении с VIIRS. Данный факт объясняется тем, что CloudSat производит измерения вдоль трека, и, следовательно, количество точек, относящихся к границам облаков, мало. В случае оценки по маскам облачности VIIRS в виде изображений вклад граничных значений учитывается в большей степени, что и приводит к небольшому снижению точности при сравнении с этими масками.

#### Летний период в дневное время суток

Из результатов визуального анализа (см. рис. 1) и расчета метрик (табл. 2) можно отметить, что маска облачности по данным прибора VIIRS сопоставима с маской облачности, полученной разработанным классификатором по данным прибора АНІ. В маске облачности VIIRS наблюдаются ложные детектирования вдоль береговых линий, рек и озер. Маска облачности АНІ лишена этих недостатков, хотя имеет тенденцию к неполному выделению краев оптически тонкой облачности (рис. 1, *г*, увеличенный масштаб в правой области рисунка, нижний ряд). Неполное выделение оптически тонкой облачности можно расценивать

Таблица 2. Оценка точности для тестируемых полигонов

Используемый прибор, сценарий	Точность	Полнота	F1
Маска облачности VIIRS, летний период, дневное время	95.86	94.25	94.95
Macкa облачности VIIRS, летний период, ночное время	95.43	63.07	75.47
Macкa облачности CloudSat, зимний период, дневное время	97.73	88.63	92.59



**Рис. 1.** Примеры масок облачности за 2 ч 20 мин. ВСВ 4 августа 2019 г. UTC (верхний ряд) и 3 ч 30 мин. 5 августа 2019 г. UTC (нижний ряд): *a*, *в* – RGB синтез каналов (R: 0.64, G: 0.86, B: 1.6 мкм); *б*, *е* – маска облачности AHI (красный цвет), наложенная поверх маски VIIRS (зеленый цвет); в правой области рисунка представлены увеличенные фрагменты масок. Линиями голубого цвета обозначены береговая (сплошная) и координатная сетка (пунктирная).

как достоинство или недостаток в зависимости от назначения маски.

Согласно проведенному тестированию, маска облачности по данным прибора АНІ обладает средней точностью около 96% и полнотой 94% в сравнении с маской VIIRS, что является достаточно высоким показателем качества.

#### Летний период в ночное время суток

Существенно более сложными являются случаи, когда отсутствуют изображения приборов в видимом диапазоне длин волн. Здесь основной проблемой является детектирование облачности нижнего яруса (слоистая, слоисто-кучевая и др.), поскольку их температура близка к температуре подстилающей поверхности, что значительно затрудняет ее обнаружение в ИК диапазоне. На рис. 2 представлены примеры полигонов в ночное время суток в летний период.

Исходя их результатов анализа формул (1) и (2) (высокое значение точности одновременно с низким показателем полноты) и результатов табл. 2, а также визуальной оценки, следует, что маска облачности по данным VIIRS зачастую имеет большое количество ложных детектирований (участки, выделенные окружностями на рис. 2), что подтверждается высоким значением показателя точности (в среднем 95%) и низким значением полноты (63%). Маска облачности АНІ уверенно детектирует облачность конвективного характера, однако для облаков, находящихся на периферии крупного облачного массива, могут наблюдаться пропуски.

#### Зимний период в дневное время суток

Упомянутая ранее проблема детектирования облачности при наличии снега и льда хорошо демонстрирует недостатки пороговых методик, что видно на примере маски облачности VIIRS на рис. 3,  $\delta$ ,  $\partial$ . Алгоритм, применяемый для расчета маски VIIRS, определяет вероятность присутствия облачности для каждого пикселя, однако даже при значении вероятности 0.995 наблюдаются артефакты в виде большого количества шумов, особенно для горных территорий. На маске облачности АНІ (рис. 3, e, e) полностью корректно выделены поля облачности, а лед и снег распознаны с высокой степенью точности.



**Рис. 2.** Примеры масок облачности за 1 августа 2019 г. 13:40 UTC (верхний ряд) и 2 августа 2019 г. 18:30 UTC (нижний ряд): *a*, *c* – RGB синтез каналов (R: 3.9, G: 11.2, B: 12.4 мкм), темные области соответствуют более низким температурам; *б*, *d* – маска облачности АНІ (красный цвет); *в*, *e*, – сравнение с масками VIIRS (зеленый цвет). Окружностями отмечены области интереса. Линиями голубого цвета обозначены береговая (сплошная) и координатная сетка (пунктирная).

В качестве альтернативы прибору VIIRS в данной работе рассматривались приборы CPR (радар) и CALIOP (лидар) KA CloudSat и CALIPSO соответственно. Оценки точности с использованием данного продукта приведены в табл. 2 для зимнего дневного времени суток. Точность валидируемой маски облачности здесь оказывается довольно высокой (в среднем 97%), что подтверждается при визуальном анализе спутниковых изображений прибора AHI. Имеющиеся ошибки связаны преимущественно с рассогласованиями приборов по времени и углу наблюдения, а также высокой чувствительностью микроволновых приборов к аэрозолям, содержащимся в атмосфере.

#### Зимний период в ночное время суток

В связи с тем, что данные продукта 2B-CLDCLASS-LIDAR недоступны в ночное время, для данного сценария производилась визуальная оценка качества. На рис. 4 представлен пример маски облачности АНІ в сравнении с маской VIIRS (рис. 4, *г*). Для удобства анализа также представлен синтез видимых каналов в дневное время суток для оценки распределения снежного покрова.

Анализируя результаты классификации в зимнее ночное время, можно прийти к выводу, что маска облачности по данным прибора VIIRS фактически обладает теми же недостатками, что и в летний сезон: артефакты вдоль береговой линии и "переоценка" облачности, однако количество ложных классификаций снега невелико. В указанной окружностью области наблюдается лед, который также был ошибочно определен маской VIIRS как облачность. Маска по данным прибора АНІ хорошо определяет холодную конвективную облачность и детектирует снег и лед, однако попрежнему часто "недооценивает" облака кучевых и слоистых форм.

#### Смена времени суток

В заключение рассмотрим сценарий, когда происходит переходный процесс между "дневной" и "ночной" масками облачности. На рис. 5 представлен характерный пример, когда облачность, хорошо заметная на видимом изображе-



**Рис. 3.** Примеры масок облачности за 1 февраля 2020 г. 0:40 UTC (верхний ряд) и 8 февраля 2020 г. 3:20 UTC (нижний ряд): a, e - RGB синтез каналов (R: 0.64, G: 0.86, B: 1.6 мкм);  $\delta, \partial$  – маска облачности VIIRS (красный цвет); e, e – сравнение с масками VIIRS (зеленый цвет). Линиями голубого цвета обозначены береговая (сплошная) и координатная сетка (пунктирная).



**Рис. 4.** Пример маски облачности за 7 февраля 2020 г. 17:50 UTC: *a* – RGB синтез каналов (R: 0.64, G: 0.86, B: 1.6 мкм) за 7 февраля 2020 г. 2:00 UTC для оценки распределения снега; *б* – ИК-канал 11 мкм, более темные области имеют более низкую температуру; *в* – маска облачности VIIRS (зеленый цвет) в сравнении с маской AHI (красный цвет). Окружностями отмечены области интереса. Линиями голубого цвета обозначены береговая (сплошная) и координатная сетка (пунктирная).

нии, сливается с подстилающей поверхностью в ИК диапазоне (участок обозначен белой окружностью на рис. 5, *a*). Также отметим, что подобные примеры облачности не включались в обучающий набор данных из-за сложностей при их ручном дешифрировании специалистами в ночное время суток. Облачный массив в нижней части изображения демонстрирует плавный переход маски облачности через линию терминатора, установленную на отметке 85° по зенитному углу Солнца.



**Рис. 5.** Пример маски облачности за 2 августа 2019 г. 21:00 UTC: *a* – RGB синтезы каналов (R: 3.9, G: 11.2, B: 12.4 мкм) и (R: 0.64, G: 0.86, B: 1.6 мкм) слева и справа от линии терминатора соответственно; *б* – маска облачности AHI. Окружностью отмечена область интереса. Линиями голубого цвета обозначены береговая (сплошная) и координатная сетка (пунктирная).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен один из наиболее перспективных подходов для решения задачи детектирования облачности применительно к данным геостационарных КА на примере Himawari-8, основанный на применении нейронной сети сверточного типа с учетом спектральных и текстурных характеристик облачности и подстилающей поверхности.

Оценка качества масок облачности, получаемых с использованием предложенного в работе классификатора, проведена с использованием валидационного набора текстур, а также методом попиксельного сопоставления с масками облачности по данным KA NOAA-20, CloudSat и CALIPSO. Процесс валидации включал в себя комплексную оценку качества с использованием метрик точности (*Precision*), полноты (*Recall*) и f1-меры в различных сценариях, включая зимний и летний сезоны, ночное и дневное время суток, а также переходный процесс (сумерки/рассвет). Ввиду трудоемкости процесса валидации, ее результаты не претендуют на абсолютную полноту, тем не менее, по имеющимся данным можно сделать вывод о высоком качестве полученного классификатора, результаты которого могут использоваться в практических целях.

Несомненными преимуществами используемого в данной работе подхода являются высокая точность детектирования снега и льда, отсутствие необходимости использования сторонних данных, кроме изображений спутникового прибора, универсальность применения алгоритма по отношению к различным климатическим и географическим условиям. Последнее достигается за счет дополнения обучающей выборки данными, полученными для других территорий, методом дообучения существующей модели. В пороговых же алгоритмах в этом случае требуется ручной подбор используемых коэффициентов и учет территориальной и временной зависимостей в аналитической форме. В то же время рассматриваемый в работе подход позволяет учитывать более сложные зависимости, чем в пороговых алгоритмах.

К недостаткам разработанной модели классификатора можно отнести неполное выделение облачности слоистых и кучевых форм (особенно в ночное время суток), а также небольшое "сглаживание" маски (следствие применения текстурного метода для классификации), что приводит к ее меньшей детализации. В общем случае к недостаткам используемого в работе подхода также можно отнести трудоемкость формирования обучающей выборки, поскольку на данном этапе требуется ручная разметка данных больших объемов (десятки тысяч для наиболее точной классификации) с привлечением опытных специалистов по дешифровке спутниковых изображений. Отметим, что отчасти доля ручного труда может быть уменьшена путем применения уже существующих масок облачности при формировании новой обучающей выборки. Кроме того, в настоящее время исследуются возможности для максимальной автоматизации формирования наборов обучающих текстур.

Одним из дальнейших направлений для улучшения классификатора, по мнению авторов, помимо спектральной и пространственной (текстурной) компонент является учет временной зависимости, для чего требуется рассмотрение последовательности спутниковых изображений. Поскольку облако представляют собой динамическую систему, анализ временной компоненты в каждом пикселе изображения может повысить точность определения облачности на фоне статичной подстилающей поверхности. Перспективным направлением для дальнейших исследований также является повышение точности детектирования облачности нижнего яруса слоистых и кучевых форм в ночное время суток.

По результатам данной работы модель классификатора была внедрена в оперативную работу Дальневосточного центра НИЦ "Планета" в состав программного комплекса для расчета параметров облачности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев А.И., Шамилова Ю.А., Холодов Е.И. Применение сверточной нейронной сети для детектирования облачности по данным прибора MCV-MP спутника "Метеор-М" № 2 // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 44–53.

Afzali Gorooh V., Kalia S., Nguyen P., Hsu Kuo-lin, Sorooshian S., Ganguly S., Nemani R. Deep Neural Network Cloud-Type Classification (DeepCTC) Model and Its Application in Evaluating PERSIANN-CCS // Remote Sensing. 2020. V. 12.  $\mathbb{N}$  2. P. 316.

https://doi.org/10.3390/rs12020316

Amato U., Antoniadis A., Cuomo V., Cutillo L., Franzese M., Murino L., Serio C. Statistical cloud detection from SEVIRI multispectral images // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. № 3. P. 750–766.

https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.004

*Chen N., Li W., Gatebe C., Tanikawa T., Hori M., Shimada R., Aoki T., Stamnes K.* New neural network cloud mask algorithm based on radiative transfer simulations // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 219. P. 62–71. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.029

*Da C.* Preliminary assessment of the Advanced Himawari Imager (AHI) measurement onboard Himawari-8 geostationary satellite // Remote Sensing Letters. 2015. V. 6. № 8. P. 637–646.

https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1066522

Drönner J., Korfhage N., Egli S., Mühling M., Thies B., Bendix J., Freisleben B., Seeger B. Fast cloud segmentation using convolutional neural networks // Remote Sensing. 2018. V. 10. № 11. P. 1782.

https://doi.org/10.3390/rs10111782

*Francis A., Sidiropoulos P., Muller J. P.* CloudFCN: Accurate and robust cloud detection for satellite imagery with deep learning // Remote Sensing. 2019. V. 11. № 19. P. 2312. https://doi.org/10.3390/rs11192312

Ganci G., Vicari A., Bonfiglio S., Gallo G., Del negro C. A texton-based cloud detection algorithm for MSG-SEVIRI multispectral images // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2011. V. 2. № 3. P. 279–290. https://doi.org/10.1080/19475705.2011.578263 *Godin R.* Joint Polar Satellite System (JPSS) VIIRS cloud mask (VCM) algorithm theoretical basis document (ATBD) // Joint Polar Satellite System (JPSS) Ground Project, Code. 2014. V. 474. P. 474–00033.

*Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.* The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. Springer Science & Business Media, 2009. P. 739

*Imai T., Yoshida R.* Algorithm theoretical basis for Himawari-8 cloud mask product // Meteorol. Satell. Center Tech. Note. 2016. V. 61. P. 1–17.

*Kingma D.P., Ba J.* Adam: A method for stochastic optimization // arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014.

*Kramareva L.S., Andreev A.I., Simonenko E.V., Sorokin A.A.* The use of a convolutional neural network for detecting snow according to the data of the multichannel satellite device of Meteor-M No. 2 spacecraft // Procedia Computer Science. 2019. V. 150. P. 368–375. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.02.065

LeCun Y., Bengio Y. Convolutional networks for images, speech, and time series // The handbook of brain theory and neural networks. 1995. V. 3361. № 10. P. 1995.

*Mahajan S., Fataniya B.* Cloud detection methodologies: Variants and development – a review // Complex & Intelligent Systems. 2019. P. 1–11.

*Mateo-García G., Adsuara E.J., Pérez-Suay A., Gómez-Chova L.* Convolutional Long Short-Term Memory Network for Multitemporal Cloud Detection Over Landmarks // IGARSS 2019–2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2019. P. 210–213. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8897832.

*Sadowski P.* Notes on backpropagation // URL: https://www.ics.uci.edu/pjsadows/notes.pdf. 2016.

Sassen K., Wang Z., Liu D. Global distribution of cirrus clouds from CloudSat/Cloud-Aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations (CALIPSO) measurements // J. Geophys. Res.: Atmos. 2008. V. 113. № D8. https://doi.org/10.1029/2008JD009972

*Stillinger T., Roberts D.A., Collar N.M., Dozier J.* Cloud masking for Landsat 8 and MODIS Terra over snow-covered terrain: Error analysis and spectral similarity between snow and cloud // Water Resour. Res. 2019. V. 55. № 7. P. 6169–6184.

https://doi.org/10.1029/2019WR024932

Sun L., Wei J., Wang J., Mi X., Guo Y., Lv Y., Yang Y., Gan P., Zhou X., Jia C., Tian X. A universal dynamic threshold cloud detection algorithm (UDTCDA) supported by a prior surface reflectance database // J. Geophys. Res.: Atmos. 2016. V. 121. № 12. P. 7172–7196. https://doi.org/10.1002/2015JD024722

*Szegedy C., Ioffe S., Vanhoucke V.* Inception-v4, Inception-ResNet and the impact of residual connection om learning // arXiv preprint:1602.07261v2, 2016.

Wang X., Min M., Wang F., Guo J., Li B., Tang S. Intercomparisons of Cloud Mask Products Among Fengyun-4A, Himawari-8, and MODIS // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2019. V. 57. № 11. P. 8827– 8839.

https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2923247

# Cloud Detection Using Himawari-8 Satellite with a Convolutional Neural Network

A. I. Andreev<sup>1, 2</sup> and Yu. A. Shamilova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Far Eastern Center, Planeta Research Center for Space Hydrometeorology, Khabarovsk, Russia <sup>2</sup>CC FEB RAS, Khabarovsk, Russia

The paper is devoted to the method of cloud detection according to the date of Himawari-8 geostationary satellite using a convolutional neural network. The developed model of cloud classifier was validated in various scenarios including summer and winter seasons of year at daytime and nighttime. Based on the validation results, it was revealed that even in complex scenarios the developed classifier admits a minimal number of errors in comparison with the state-of-art cloud detection algorithms in the world operational practice.

Keywords: neural network, cloud mask, cloud detection, CNN, multispectral image classification, Himarari-8

#### REFERENCES

*Andreev A.I., Shamilova Y.A., Kholodov E.I.* Using Convolutional Neural Networks for Cloud Detection from Meteoror-M No. 2 MSU-MR Data // Russian Meteorology and Hydrology. 2019. V. 44. № 7. P. 459–466. DOI: 10.3103/S1068373919070045

*Afzali Gorooh V., Kalia S., Nguyen P., Hsu Kuo-lin, Sorooshian S., Ganguly S., Nemani R.* Deep Neural Network Cloud-Type Classification (DeepCTC) Model and Its Application in Evaluating PERSIANN-CCS // Remote Sensing. 2020. V. 12. № 2. P. 316. DOI: 10.3390/rs12020316

Amato U., Antoniadis A., Cuomo V., Cutillo L., Franzese M., Murino L., Serio C. Statistical cloud detection from SEVIRI multispectral images // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. № 3. P. 750–766. DOI: 10.1016/ j.rse.2007.06.004

*Chen N., Li W., Gatebe C., Tanikawa T., Hori M., Shimada R., Aoki T., Stamnes K.* New neural network cloud mask algorithm based on radiative transfer simulations // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 219. P. 62–71. DOI: 10.1016/j.rse.2018.09.029

*Da C.* Preliminary assessment of the Advanced Himawari Imager (AHI) measurement onboard Himawari-8 geostationary satellite // Remote Sensing Letters. 2015. V. 6. № 8. P. 637–646. DOI: 10.1080/2150704X.2015.1066522

Drönner J., Korfhage N., Egli S., Mühling M., Thies B., Bendix J., Freisleben B., Seeger B. Fast cloud segmentation using convolutional neural networks // Remote Sensing. 2018. V. 10. № 11. P. 1782. DOI: 10.3390/rs10111782

*Francis A., Sidiropoulos P., Muller J.P.* CloudFCN: Accurate and robust cloud detection for satellite imagery with deep learning // Remote Sensing. 2019. V. 11. № 19. P. 2312. DOI: 10.3390/rs11192312

*Ganci G., Vicari A., Bonfiglio S., Gallo G., Del negro C.* A texton-based cloud detection algorithm for MSG-SEVIRI multispectral images // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2011. V. 2. №. 3. P. 279–290. DOI: 10.1080/19475705.2011.578263

*Godin R.* Joint Polar Satellite System (JPSS) VIIRS cloud mask (VCM) algorithm theoretical basis document (ATBD) // Joint Polar Satellite System (JPSS) Ground Project, Code. 2014. V. 474. P. 474–00033.

*Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.* The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. Springer Science & Business Media, 2009. P. 739

*Imai T., Yoshida R.* Algorithm theoretical basis for Himawari-8 cloud mask product // Meteorol. Satell. Center Tech. Note. 2016. V. 61. P. 1–17. *Kingma D.P., Ba J.* Adam: A method for stochastic optimization // arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014.

*Kramareva L.S., Andreev A.I., Simonenko E.V., Sorokin A.A.* The use of a convolutional neural network for detecting snow according to the data of the multichannel satellite device of Meteor-M No. 2 spacecraft // Procedia Computer Science. 2019. V. 150. P. 368–375. DOI: 10.1016/ j.procs.2019.02.065.

LeCun Y., Bengio Y. Convolutional networks for images, speech, and time series // The handbook of brain theory and neural networks. 1995. V. 3361.  $\mathbb{N}$  10. P. 1995.

*Mahajan S., Fataniya B.* Cloud detection methodologies: Variants and development — a review // Complex & Intelligent Systems. 2019. P. 1–11.

Mateo-García G., Adsuara E.J., Pérez-Suay A., Gómez-Chova L. Convolutional Long Short-Term Memory Network for Multitemporal Cloud Detection Over Landmarks // IGARSS 2019–2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2019. P. 210–213. DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8897832

*Sadowski P.* Notes on backpropagation // URL: https://www.ics.uci.edu/pjsadows/notes.pdf. 2016.

Sassen K., Wang Z., Liu D. Global distribution of cirrus clouds from CloudSat/Cloud-Aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations (CALIPSO) measurements // J. Geophys. Res.: Atmos. 2008. V. 113. № D8. DOI: 10.1029/2008JD009972

*Stillinger T., Roberts D.A., Collar N.M., Dozier J.* Cloud masking for Landsat 8 and MODIS Terra over snow-covered terrain: Error analysis and spectral similarity between snow and cloud // Water Resour. Res. 2019. V. 55. № 7. P. 6169–6184. DOI: 10.1029/2019WR024932

Sun L., Wei J., Wang J., Mi X., Guo Y., Lv Y., Yang Y., Gan P., Zhou X., Jia C., Tian X. A universal dynamic threshold cloud detection algorithm (UDTCDA) supported by a prior surface reflectance database // J. Geophys. Res.: Atmos. 2016. V. 121. № 12. P. 7172–7196. DOI: 10.1002/2015JD024722

*Szegedy C., Ioffe S., Vanhoucke V.* Inception-v4, Inception-ResNet and the impact of residual connection om learning // arXiv preprint:1602.07261v2, 2016.

Wang X., Min M., Wang F., Guo J., Li B., Tang S. Intercomparisons of Cloud Mask Products Among Fengyun-4A, Himawari-8, and MODIS // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2019. V. 57. № 11. P. 8827–8839. DOI: 10.1109/TGRS.2019.2923247

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

# ОТКРЫТАЯ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ МЕТОДА РАСЩЕПЛЕННОГО ОКНА ПРОЗРАЧНОСТИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ LANDSAT 8

© 2021 г. Э. Э. Казаков<sup>а, \*</sup>, Ю. И. Борисова<sup>а, b</sup>

<sup>а</sup>Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия <sup>b</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия \*E-mail: ee.kazakov@gmail.com Поступила в редакцию 17.06.2020 г.

Представлена открытая программная реализация алгоритма восстановления температуры поверхности Земли по данным спутника дистанционного зондирования Landsat 8, использующая метод расщепленного окна прозрачности, дополненный ковариационно-вариационным подходом к моделированию содержания водяного пара в атмосфере. В реализации также используются метод атмосферной коррекции SREM и алгоритм детектирования облаков и затенений FMASK. Все составляющие комплексного алгоритма полностью автоматизированы и не требуют дополнительной информации, в том числе внешних данных о состоянии атмосферы. Проведена валидация реализации алгоритма при различных настройках на основе 10 наземных станций на территории США, публикующих данные о наблюдениях за температурой поверхности с высоким временным разрешением, средняя абсолютная ошибка по ее результатам составила 1.1°C. Программный компонент разработан на языке Python и доступен в публичном репозитории https://github.com/eduard-kazakov/Landsat8\_LST\_PSWA, исходный код распространяется по открытой лицензии.

*Ключевые слова*: температура поверхности, дистанционное зондирование, Landsat 8, TIRS, SREM, FMASK, метод расщепленного окна прозрачности

DOI: 10.31857/S0205961421010073

## введение

Среди всего многообразия геофизических параметров, мониторинг которых осуществляется средствами дистанционного зондирования из космоса, температура поверхности Земли остается одним из наиболее важных и широко используемых в самых различных отраслях науки и народного хозяйства: от исследований энергетического баланса планеты (Кондратьев, Крапивин, 2006) до мониторинга сельскохозяйственных угодий (Son et al., 2012) и поиска полезных ископаемых (Тронин и др., 2011). В последние годы интерес к данным космического теплового мониторинга возрастает также в связи с изменениями климата и изучением динамики, генезиса и роли городских островов тепла (Горный и др., 2016).

Для изучения масштабных процессов широко используются данные публичных космических программ американского и европейского космических агентств, в частности материалы тепловых съемок с космических аппаратов (КА) Тегга, Aqua, NOAA, Metop, Sentinel-3, Suomi-NPP, которые обеспечивают высокое качество материалов при высокой периодичности съемки (в совокупности – субсуточной), однако имеют существенные ограничения применимости по причине низкого пространственного разрешения (от 750 м). Для исследования локальных особенностей распределения и динамики температуры поверхности (например, в городских (Keeratikasikorn, Bonafoni, 2018; Балдина, Грищенко, 2011) или сельскохозяйственных (Anderson et al., 2012) задачах) требуются более детализированные данные, среди публично доступных и активных на сегодняшний представленные всего тремя сенсорами: ASTER (KA Terra), ETM+ (KA Landsat 7) и TIRS (KA Landsat 8). Несмотря на низкую периодичность съемки, относительно высокое (от 30 м) пространственное разрешение обуславливает огромную востребованность таких данных. Их дефицит, среди прочего, приводит к разработке подходов искусственного улучшения пространственного разрешения температурных данных (Крицук и др., 2016).

При этом данные, получаемые с датчиков с относительно высоким пространственным разре-

шением, распространяются в виде исходных, непосредственно зарегистрированных спутником радиояркостных температур (brightness temperature), что затрудняет их использование, особенно непрофессионалами, а также часто вводит в заблуждение (например, из-за того, что радиояркостные температуры могут выражаться в той же размерности, что и физические температуры, например в Кельвинах). Связь между зарегистрированными радиояркостными температурами и физическими температурами (surface temperature) объектов сложна и нелинейна, она зависит от свойств материалов и состояния атмосферы в момент съемки (Li et al. 2013), а разница между ними может достигать 7 и более градусов (Olioso et al., 2013).

Существует большое количество алгоритмов и методов пересчета радиояркостных температур в физические температуры для разных сенсоров, однако большая их часть требует наличия вспомогательной информации – о фактическом состоянии атмосферы и свойствах подстилающей поверхности, а также либо не имеют открытых программных реализаций, либо привязаны к конкретным ГИС платформам, зачастую проприетарным (Walawender et al., 2012). Это заметно усложняет получение массовым пользователем корректных материалов и приводит к широкому использованию радиояркостных температур со всеми сопутствующими проблемами и ошибками интерпретации данных.

Тем не менее, появляются подходы, упрощающие расчеты физической температуры, избавляя от необходимости привлечения дополнительных данных при сохранении приемлемого качества вычислений. Мы предлагаем развитие одного из таких подходов, описанного в работах (Du et al., 2015; Ren et al. 2015), для материалов сенсора TIRS, а также его публичную открытую программную реализацию на языке Python, которую можно использовать как для единичных расчетов, так и для встраивания в автоматизированные системы мониторинга окружающей среды.

#### МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ LANDSAT 8

Данные сенсора TIRS (КА Landsat 8) наиболее популярны и востребованы в нише публичной информации о температуре подстилающей поверхности с относительно высоким пространственным разрешением. Это самые современные и качественные данные такого рода, доступ к которым может осуществляться как вручную с помощью простых в использовании графических веб-интерфейсов, так и автоматически с помощью программных интерфейсов. Сенсор TIRS осуществляет регистрацию собственного теплового излучения поверхности Земли в двух каналах с номерами 10 и 11, которым соответствуют диапазоны длин волн от 10.30 до 11.30 мкм и от 11.50 до 12.50 мкм. На основе данных TIRS проводятся многочисленные исследования природных и антропогенных систем как за рубежом, так и в России, а проблема восстановления физических температур на основе радиояркостных обсуждается с момента появления первых снимков в 2013 г.

В основе всех существующих алгоритмов лежит закон Планка, связывающий радиометрическую температуру с физической для абсолютно черного тела и идеальных условий, а дальнейшие изыскания, обобщенно, преследуют две цели – определение излучательной способности поверхности (surface emissivity), которая выражает различие в радиометрическом поведении зондируемых объектов относительно абсолютного черного тела, и учет влияния атмосферы и некоторых других факторов. Наибольшее распространение получили, в различных модификациях, методы: одноканальный (single-channel) (Cristóbal et al., 2018), расшепленного окна прозрачности (splitwindow, иногда в русскоязычной литературе также используется термин "метод разделенных окон") (Rozenstein et al., 2014), основанные на уравнениях переноса излучения (radiative transfer equationbased) (Yu et al., 2014). Предлагаются и другие подходы (Алескерова и др., 2016; Станкевич и др., 2015). Определение излучательной способности, которая является входным параметром в любом вышеуказанном методе (но может быть получена независимо), также решается разными способами, в числе которых наиболее распространены основанные на вегетационных индексах и на картах классификации типов ланлшафтов (Sobrino et al., 2008). Информацию о сравнении различных подходов можно найти в работах (Wang et al., 2019; García-Santos et al., 2018; Yu et al., 2014), в том числе по проблеме излучательной способности (Sekertekin, Bonafoni, 2020; Perez Hoyos, 2014).

Метод расшепленного окна прозрачности выделяется на фоне остальных алгоритмов за счет того, что использует для вычислений только один дополнительный параметр - содержание водяного пара в атмосфере в момент съемки (другие подходы зачастую требуют обширной метеорологической информации, величин восходящих и нисходящих потоков радиации и других, более труднодоступных характеристик). Он используется при обработке тепловых данных, получаемых с самых разных сенсоров дистанционного зондирования (Успенский и др., 2015). В разных работах предлагается получение информации о водяном паре из материалов других спутниковых съемок (Cristóbal et al., 2018) или на основе наземных измерений. Примечательнее, в контексте необходимости автоматизации и независимости от внешних данных, методы восстановления концентрации водяного пара на основе самих спутниковых изображений, например с использованием ковариационно-вариационного подхода на основе измерений собственного теплового излучения поверхности в двух диапазонах длин волн (Ren et al., 2015).

#### АВТОНОМНЫЙ МЕТОД РАСЩЕПЛЕННОГО ОКНА ПРОЗРАЧНОСТИ

Метод расщепленного окна прозрачности, лежащий в основе реализованного нами алгоритма, в конечном счете сводится к линейному уравнению следующего вида (Du et al. 2015):

$$LST = b_{0} + \left(b_{1} + b_{2}\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + b_{3}\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^{2}}\right)\frac{T_{10} + T_{11}}{2} + \left(b_{4} + b_{5}\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + b_{6}\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^{2}}\right)\frac{T_{10} - T_{11}}{2} + b_{7}\left(T_{10} - T_{11}\right)^{2},$$

где LST — искомая температура поверхности;  $b_0...b_7$  — коэффициенты, зависящие от концентрации водяного пара в атмосфере;  $\varepsilon$  — средняя излучательная способность поверхности для длин волн, соответствующих 10 и 11 каналам TIRS,  $\Delta \varepsilon$  разница между излучательными способностями поверхности для длин волн, соответствующих 10 и 11 каналам TIRS;  $T_{10}, T_{11}$  — радиояркостные температуры в 10 и 11 каналах TIRS. Коэффициенты  $b_0...b_7$  рассчитаны на основе моделирования для разных диапазонов концентраций водяного пара и приведены в работе (Du et al., 2015). Значения излучательной способности  $\varepsilon_{10}$  и  $\varepsilon_{11}$  рассчитываются на основе вегатационного индекса NDVI по следующим выражениям (Yu et al., 2014):

$$\epsilon_{10} = \begin{cases} 0.973 - 0.047\rho_R, & \text{NDVI} < 0.2\\ 0.9863P_\nu + 0.9668(1 - P_\nu) + 0.018(1 - P_\nu), & 0.2 \le \text{NDVI} \le 0.5\\ 0.9863 + 0.018(1 - P_\nu), & \text{NDVI} > 0.5 \end{cases}$$
  
$$\epsilon_{11} = \begin{cases} 0.984 - 0.0026\rho_R, & \text{NDVI} < 0.2\\ 0.9896P_\nu + 0.9747(1 - P_\nu) + 0.0138(1 - P_\nu), & 0.2 \le \text{NDVI} \le 0.5\\ 0.9896 + 0.0138(1 - P_\nu), & \text{NDVI} > 0.5, \end{cases}$$

где  $P_v$  — растительная фракция (vegetation fraction), рассчитываемая по формуле (Carlson, Ripley, 1997; Sobrino et al. 2004):

$$P_{v} = \left(\frac{\text{NDVI} - 0.2}{0.3}\right)^{2},$$

где NDVI – нормализованный вегетационный индекс растительности (Myneni et al., 1995), основанный на отражательной способности поверхности в красном и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн. Получение отражательных способностей поверхности мы предлагаем производить по исходным данным Landsat 8 на основе алгоритма атмосферной коррекции SREM (Bilal et al., 2019), который имеет открытую программную реализацию и высокое качество для расчета вегетационных индексов (Казаков, Борисова, 2020), при том, что не требует никаких дополнительных данных о фактическом состоянии атмосферы. Именно этот подход реализован в нашем программном модуле. Также могут использоваться результаты работы любого другого алгоритма атмосферной коррекции или некорректированные отражательные способности, использование которых, однако, приводит к снижению качества и не рекомендуется.

Содержание водяного пара, необходимое для получения значений коэффициентов  $b_0...b_7$ , рассчитывается с использованием ковариационновариационного подхода по следующей формуле (Du et al., 2015):

$$cwv = c_0 + c_1 \left(\frac{\tau_{11}}{\tau_{10}}\right) + c_2 \left(\frac{\tau_{11}}{\tau_{10}}\right)^2$$

где *сwv* — содержание водяного пара в атмосферном столбе (г/см<sup>2</sup>);  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  — коэффициенты, рассчитанные в результате моделирования и равные — 9.674, 0.653 и 9.087 соответственно,  $\tau_{10}$  и  $\tau_{11}$  прозрачность атмосферы на длинах волн 10 и 11 каналов Landsat 8 соответственно. Их соотноше-

ние, то есть величина  $\frac{\tau_{11}}{\tau_{10}}$ , может быть приближен-

но вычислена с использованием ковариационновариационного подхода на основе радиометрических температур 10 и 11 каналов Landsat. Для этого выбирается скользящее окно размером М × М пикселей, с которым осуществляется полный обход снимка, и в каждом состоянии окна производится вычисление по следующей формуле:

$$\frac{\tau_{11}}{\tau_{10}} \approx \frac{\sum_{k=1}^{N} (T_{10,k} - \overline{T_{10}}) (T_{11,k} - \overline{T_{11}})}{\sum_{k=1}^{N} (T_{10,k} - \overline{T_{10}})^{2}},$$

где N – количество пикселей в окне, то есть М×М пикселей,  $T_{10,k}$ ,  $T_{11,k}$  – значение текущего

перебираемого пикселя в пределах окна для радиометрической температуры в 10 и 11 каналах Landsat 8 соответственно,  $\overline{T_{10}}$ ,  $\overline{T_{11}}$  – среднее значение радиометрической температуры в пределах окна для 10 и 11 каналов Landsat 8 соответственно. Такой подход обеспечивает определение содержания водяного пара со средней квадратической ошибкой около 0.5 г/см<sup>2</sup> (Ren et al., 2015).

Технически расчет содержания водяного пара предполагает параметризацию в виде определения размера скользящего окна, в рамках которого на основе двух тепловых каналов Landsat 8 производится вычисление. Влияние этого параметра на качество определения и на потребление ресурсов приводится в разделе валидации.

Также при итеративном расчете в каждом окне должны быть проигнорированы облачные пиксели, для этого предварительно осуществляется маскирование облаков и затененных областей с использованием алгоритма FMASK (Zhu et al., 2015). Общая схема работы комплексного алгоритма такова: выбирается исходная сцена Landsat 8 уровня обработки L1C и размер скользящего окна в пикселях, производятся маскирование облаков и затенений алгоритмом FMASK и атмосферная коррекция алгоритмом SREM для красного и ближнего инфракрасного каналов, по которым последовательно рассчитываются NDVI, растительная фракция и излучательные способности для каналов TIRS. Затем, на основе радиояркостных температур каналов TIRS, по ковариационно-вариационному методу с заданным размерном скользящего окна производится расчет концентраций водяного пара, определяющих значения коэффициентов  $b_0...b_7$ . Наконец, радиояркостные температуры каналов TIRS, соответствующие им излучательные способности и полученные из концентраций водяного пара коэффициенты используются в формуле метода расщепленного окна прозрачности для расчета физической температуры поверхности.

На рис. 1 приведен пример расчета температуры поверхности и его сравнение с радиояркостной температурой в 10 канале, а также их совместное сравнение с измерением температуры на наземной станции. Хорошо видно, что в среднем разница между температурами составляет около 4 градусов, однако распределение этой разницы нелинейно, а в отдельных местоположениях изменяется ее знак.

Все шаги алгоритма полностью автономны и не требуют дополнительной информации, помимо исходных данных Landsat и метаданных снимка, распространяемых в стандартном продукте уровня L1C, доступного для загрузки без ограничений.

#### ВАЛИДАЦИЯ

Для валидации алгоритма были использованы данные опорной климатической сети США (U.S. Climate Reference Network, USCRN), включающей более 140 станций, ведущих разнообразные наблюдения (https://www.ncdc.noaa.gov/crn/overview.html). На многих станциях ведутся, в том числе, наблюдения за температурой поверхности Земли с временной дискретностью 5 мин, что позволяет эффективно использовать их для калибровки и валидации соответствующих алгоритмов. Данные о наблюдениях (в том числе полной истории и оперативных данных с задержкой ~3.5 ч) доступны в веб-хранилище: https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/uscrn/products/subhourly01/.

Мы использовали данные с 10 станций, расположенных на различных широтах от Флориды до Аляски, и 10 сцен Landsat 8 уровня обработки L1C, полученных на портале earthexplorer.usgs.gov. Расположение использованных станций приведено на рис. 2. использованные сцены описаны в табл. 1.

Для каждой сцены Landsat 8 была произведена серия расчетов с различным значением размера стороны скользящего окна: для 7, 9, 11, 15, 21, 27, 35, 45, 61, 81, 101 и 145 пикселей. Для каждого расчета определялась ошибка вычисления температуры по наземной станции, а также измерялось время выполнения на настольном компьютере с характеристиками: ЦП Intel Core i5-8500 3000 МГц, 16 Гб ОЗУ 2400 МГц (среда вычислений Python 3.8.2). Распределение абсолютных ошибок определения температуры поверхности и времени расчетов для всех станций при разных размерах скользящего окна приведено на рис. 3.

Размер скользящего окна не оказывает существенного влияния на производительность алгоритма, в среднем обработка одного снимка на современном настольном компьютере занимает порядка 10 мин, что достаточно даже для оперативных задач. Изначально были ожидания снижения времени расчетов при увеличении размера окна (так как уменьшалось количество итераций цикла обхода снимка). Но из-за роста вычислительной сложности ковариационно-вариационного алгоритма при увеличении числа элементов в матрице этот эффект полностью нивелировался. Распределение абсолютных ошибок также оказалось сравнимым, однако при размере окна в 7 пикселей среднее ее значение оказалось наименьшим и составило 1.1°С при разбросе от 0.2 до 2.1°С. На рис. 4 приведено распределение восстановленных значений температуры поверхности относительно валидационных для расчетов с размерами скользящего окна 7 и, для сравнения, 15.

С учетом несущественного роста времени расчетов (около 10%) можно рекомендовать исполь-



**Рис. 1.** a – радиояркостная температура в 10 канале (диапазон длин волн от 10.30 до 11.30 мкм.) для фрагмента снимка Landsat 8 на территорию юго-востока США от 28 ноября 2019 г.;  $\delta$  – рассчитанная температура поверхности для того же фрагмента снимка; a – значения температуры вдоль профиля, обозначенного белой линией на изображениях a и  $\delta$ , для радиояркостной и рассчитанной температур, а также значение температуры на наземной станции в момент съемки. Станция обозначена черной точкой в белом круге на изображениях a и  $\delta$ . Территория преимущественно представлена лесными и сельскохозяйственными землями.

зование размера скользящего окна равного 7 по умолчанию. Само значение средней абсолютной ошибки показывает, что алгоритм можно применять для большинства практических задач.

При оценке и интерпретации данных о сравнении восстановленных по спутниковым измерениям и зарегистрированных наземными методами температур необходимо помнить о пространственной неоднородности территории в пределах каждого пикселя спутникового изображения. Для данных Landsat 8, имеющих относительно высокое пространственное разрешение, этот эффект не настолько критичен, как, к примеру, для тепловых данных Sentinel-3 или Terra/Aqua с пространственным разрешением около 1 км на пиксель, однако определенное влияние он оказывает, особенно при валидации на наземных станциях, находящихся в окружении сложного ландшафта. Также известен эффект перегрева, в теплое время года обуславливающий занижение спутниковых оценок температуры (Волкова, Успенский, 2016), что также может приводить к возрастанию регистрируемых ошибок.

## ОТКРЫТАЯ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Мы предлагаем собственную программную реализацию автоматизированного метода расщепленного окна прозрачности на языке Python, распространенном в среде ученых и специалистов, связанных с науками о Земле и об окружающей среде. Исходный код распространяется по открытой лицензии GNU GPL v.3 и доступен по адресу

## КАЗАКОВ, БОРИСОВА



Рис. 2. Размещение станций и охваты сцен, использованных при валидации.

https://github.com/eduard-kazakov/Landsat8\_LST\_P-SWA. Алгоритм реализован в виде программного компонента, который можно использовать сам по себе или интегрировать в любое другое приложение. Документация, содержащая руководство по установке и использованию, а также перечень зависимостей, доступна в репозитории по указанной ссылке.

Таблица 1. Использованные для валидации сцены Landsat 8 и валидирующие станции USCR	N
---	---

Идентификатор сцены	Дата и время (UTC)	Наземная валидирующая станция
LC08_L1TP_036026_20190916_20190925_01_T1	2019-09-16 17:53	Wolf Point 29 ENE
LC08_L1TP_012030_20190924_20191017_01_T1	2019-09-24 15:27	Durham 2 SSW Durham 2 N
LC08_L1TP_015042_20200307_20200314_01_T1	2020-03-07 15:49	Everglades City 5 NE
LC08_L1TP_020036_20200411_20200411_01_RT	2020-04-11 16:18	Gadsden 19 N
LC08_L1TP_018038_20200413_20200413_01_RT	2020-04-13 16:06	GA Newton 8 W GA Newton 11 SW
LC08_L1TP_019038_20200404_20200410_01_T1	2020-04-04 16:12	GA Newton 8 W GA Newton 11 SW
LC08_L1TP_028032_20200215_20200225_01_T1	2020-02-15 17:06	Lincoln 8 ENE
LC08_L1TP_019038_20191128_20191216_01_T1	2019-11-28 16:13	GA Newton 8 W GA Newton 11 SW
LC08_L1TP_069014_20190603_20190618_01_T1	2019-06-03 21:12	Fairbanks 11 NE
LC08_L1TP_070014_20190626_20190705_01_T1	2019-06-26 21:19	Fairbanks 11 NE



**Рис. 3.** Сверху – распределение ошибок определения температуры по всем валидирующим станциям в зависимости от размера скользящего окна (каждый "ящик" описывает характер распределения средних абсолютных ошибок при заданном размере скользящего окна: линия в середине "ящика" – медианное значение выборки, границы "ящика" – первый и третий квартили выборки, концы исходящих из "ящиков" линий – края статистически значимой выборки (без выбросов), крестами показаны статистически экстремальные значения выборки (выбросы)). Снизу – среднее время обработки одной сцены и его разброс (черными линиями) для разных настроек размера скользящего окна.



**Рис. 4.** Распределение ошибок по всем валидирующим станциям для расчетов с размером скользящего окна 7 (слева) и 15 (справа).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 2 2021

Программный модуль может осуществлять расчеты в нескольких режимах, в частности, пользователь может управлять способом получения значений излучательной способности территории. Так, доступны следующие варианты:

• Автоматический расчет по NDVI с использованием атмосферной коррекции SREM (опция по умолчанию, рекомендуемая).

• Автоматический расчет по NDVI без атмосферной коррекции (увеличивает скорость расчетов, не требует установки открытого модуля SREM, уменьшает качество).

• Получение излучательной способности по карте типов земель.

• Использование существующего набора данных по излучательной способности (применимо, если пользователь осуществил расчет в другой программе или получил качественные данные где-либо).

Также пользователь может управлять размером скользящего окна, и, при необходимости, настройками алгоритма маскирования облаков и затененных областей, в том числе его чувствительностью и размером буферизации вокруг облаков и теней. Сама процедура запуска расчетов минималистична и выполняется вызовом одной команды с указанием путей до всех необходимых источников данных.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в результате тестирования и валидации результаты показывают приемлемые метрики как средних абсолютных ошибок (1.1°С при оптимальном размере скользящего окна), так и вычислительных затрат (~10 мин на обработку одного снимка).

Авторы надеются, что публикация программного кода простого в использовании, но достаточно эффективного автономного алгоритма вычисления температуры поверхности Земли по данным публичной программы дистанционного зондирования Landsat 8 поможет исследователям и практикующим специалистам с минимальными усилиями получать более качественные данные о тепловом режиме территории относительно высокого пространственного разрешения, избегая грубых ошибок и некорректных интерпретаций. Реализованный метод не является заменой других профессиональных подходов, например ассимилирующих информацию о фактическом состоянии атмосферы, а лишь предлагает упрощенную, но качественную альтернативу им для задач, когда получение внешних данных и использование более сложных алгоритмов затруднено или невозможно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алескерова А.А., Кубряков А.А. Станичный С.В. Двухканальный метод восстановления температуры поверхности Черного моря по измерениям Landsat-8 // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 4. С. 57–64.

Балдина Е.А., Грищенко М.Ю. Исследование "теплового острова" Москвы по разносезонным снимкам LANDSAT-7/ETM+ // Геоинформатика. 2011. № 3. С. 61–69.

Волкова Е.В., Успенский С.А. Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности, приземной температуры воздуха и эффективной температуры по спутниковым данным для юга Европейской территории России // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 291–303.

Горный В.И., Лялько В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А., Филиппович В.Е., Станкевич С.А., Бровкина О.В., Киселев А.В., Давидан Т.А., Лубский Н.С. Прогноз тепловой реакции городской среды Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата (по материалам съемок спутниками EOS и Landsat) // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 176–191.

Казаков Э.Э., Борисова Ю.И. Оценка применимости алгоритма атмосферной коррекции SREM для анализа временных рядов на примере данных Landsat и его от-крытая программная реализация // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 30–39.

Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Радиационный баланс Земли как индикатор глобального экологического равновесия // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 1. С. 3–9.

Крицук С.Г., Горный В.И., Латыпов И.Ш. Повышение детальности спутникового картографирования теплофизических характеристик земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 277–290.

Станкевич С.А., Филиппович В.Е., Лубский Н.С., Крылова А.Б., Крицук С.Г., Бровкина О.В., Горный В.И., Тронин А.А. Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизованной территории по материалам тепловой космической съемки // Український журн. дистанційного зондування Землі. 2015. № 7. С. 12–21.

*Тронин А.А., Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов, И.Ш.* Спектральные методы дистанционного зондирования в геологии. Обзор // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 23–36.

Успенский А.Б., Кухарский А.В., Успенский С.А. Валидация результатов спутникового мониторинга температуры поверхности суши // Метеорология и гидрология. 2015. № 2. С. 81–95.

Anderson M.C., Allen R.G., Morse A., Kustas W.P. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources // Remote Sens. Environ. 2012. V. 122. P. 50–65.

Bilal M., Nazeer M., Nichol J.E., Bleiweiss M.P., Qiu Z., Jäkel E., Campbell J.R., Atique L., Huang X., Lolli S. A simplified and robust surface reflectance estimation method (SREM) for use over diverse land surfaces using multi-sensor data // Remote Sens. 2019. V. 11.  $\mathbb{N}$  11. P. 1344. *Carlson T.N., Ripley D.A.* On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index // Remote Sens. Environ. 1997. V. 62. P. 241–252.

Cristóbal J., Jiménez-Muñoz J.C., Prakash A., Mattar C., Skoković D., Sobrino J.A. An improved single-channel method to retrieve land surface temperature from the Landsat-8 thermal band // Remote Sens. 2018. V. 10.  $\mathbb{N}_{2}$  3. P. 431.

*Du C., Ren H., Qin Q., Meng J., Zhao S.* A Practical Split-Window Algorithm for Estimating Land Surface Temperature from Landsat 8 Data // Remote Sens. 2015. V. 7. № 1. P. 647–665.

*García-Santos V., Cuxart J., Martínez-Villagrasa D., Jiménez M.A., Simó G.* Comparison of three methods for estimating land surface temperature from Landsat 8-TIRS sensor data // Remote Sens. 2018. V. 10. № 9. P. 1450.

*Keeratikasikorn C., Bonafoni S.* Urban heat island analysis over the land use zoning plan of Bangkok by means of Landsat 8 imagery // Remote Sens. 2018. V. 10.  $\mathbb{N}_{2}$  3. P. 440.

*Li Z.L., Tang B.H., Wu H., Ren H., Yan G., Wan Z., Trigo I.F., Sobrino J.A.* Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives // Remote Sens. Environ. 2013. V. 131. P. 14–37.

*Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L.* The interpretation of spectral vegetation indexes // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1995. V. 33. № 2. P. 481–486.

*Olioso A., Mira M., Courault D., Marloie O., Guillevic P.* Impact of surface emissivity and atmospheric conditions on surface temperatures estimated from top of canopy brightness temperatures derived from Landsat 7 data // 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'13). 21–26 July 2013. Melbourne, Australia, 2013. P. 3033–3036.

*Perez Hoyos I.C.* Comparison between land surface temperature retrieval using classification based emissivity and NDVI based emissivity // International J. Recent Development in Engineering and Technology. 2014. V. 2. № 2. P. 26–30.

Ren H., Du C., Liu R., Qin Q., Yan G., Li Z.L., Meng J. Atmospheric water vapor retrieval from Landsat 8 thermal infrared images // J. Geophys. Res.: Atmos. 2015. V. 120. N $_{2}$  5. P. 1723–1738.

*Rozenstein O., Qin Z., Derimian Y. Karnieli A.* Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm // Sensors. 2014. V. 14. № 4. P. 5768–5780.

*Sekertekin A., Bonafoni S.* Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation // Remote Sens. 2020. V. 12. P. 294.

*Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L.* Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5 // Remote Sens. Environ. 2004. V. 90. P. 434–440

Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Sòria G., Romaguera M., Guanter L., Moreno J., Plaza A., Martínez P. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2008. V. 46. № 2. P. 316–327.

Son N.T., Chen C.F., Chen C.R., Chang L.Y., Minh V.Q. Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data // Int. J. Appl. Earth Obs. 2012. V. 18. P. 417–427.

*Walawender J.P., Hajto M.J., Iwaniuk P.* A new ArcGIS toolset for automated mapping of land surface temperature with the use of LANDSAT satellite data // 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'12). 22–27 July 2012. Munich, Germany, 2012. P. 4371–4374.

*Wang L., Lu Y., Yao Y.* Comparison of Three Algorithms for the Retrieval of Land Surface Temperature from Landsat 8 Images // Sensors. 2019. V. 19. P. 5049.

*Yu X., Guo X., Wu Z.* Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS-comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method // Remote Sens. 2014. V. 6. P. 9829–9852.

*Zhu Z., Wang S., Woodcock C.E.* Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images // Remote Sens. Environ. 2015. V. 159. P. 269–277.

# Open Source Software Implementation and Validation of Split-Window Method for Automated Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Data

# E. E. Kazakov<sup>1</sup> and Yu. I. Borisova<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>State Hydrological Institute, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

An open source software implementation of the algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat 8 remote sensing satellite data is presented. Split-window algorithm, supplemented by a covariance-variance technique for modeling the water vapor content in the atmosphere is used. The implementation also uses SREM atmospheric correction method and FMASK cloud and shadow detection algorithm. All components of the complex algorithm are fully automated and do not require additional information, such as external data on the state of the atmosphere. The algorithm implementation was validated at various settings with 10 ground stations in the United States that publish data on observations of surface temperature with high time resolution. The estimated average absolute error is about 1.1°C. The software implementation is developed in Python and available in a public repository https://github.com/eduard-kazakov/Landsat8\_LST\_PSWA, the source code is distributed under an open license.

Keywords: land surface temperature, remote sensing, landsat 8, tirs, srem, fmask, split-window algorithm

#### REFERENCES

Aleskerova A.A., Kubryakov A.A., Stanichny S.V. Dvuhkanal'nyj metod vosstanovleniya temperatury poverhnosti chernogo morya po izmereniyam Landsat-8 [The Two-Channel Method for Reconstructing Sea Surface Temperature from Landsat-8 Measurements] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2016. № 4. P. 57–64 (In Russian).

Anderson M.C., Allen R.G., Morse A., Kustas W.P. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources // Remote Sens. Environ. 2012. V. 122. P. 50–65.

Baldina E.A., Grishenko M.Y. Issledovanie "teplovogo ostrova" Moskvy po raznosezonnym snimkam LANDSAT-7/ETM+ [Study of urban heat island using multiseasonal Landsat 7/ETM+ thermal imagery: case study of Moscow] // Geoinformatica. 2011.  $N_{\odot}$  3. P. 61–69 (In Russian).

Bilal M., Nazeer M., Nichol J.E., Bleiweiss M.P., Qiu Z., Jäkel E., Campbell J.R., Atique L., Huang X., Lolli S. A simplified and robust surface reflectance estimation method (SREM) for use over diverse land surfaces using multi-sensor data // Remote Sens. 2019. V. 11. № 11. P. 1344.

*Carlson T.N., Ripley D.A.* On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index // Remote Sens. Environ. 1997. V. 62. P. 241–252.

*Cristóbal J., Jiménez-Muñoz J.C., Prakash A., Mattar C., Skoković D., Sobrino J.A.* An improved single-channel method to retrieve land surface temperature from the Landsat-8 thermal band // Remote Sens. 2018. V. 10. № 3. P. 431.

*Du C., Ren H., Qin Q., Meng J., Zhao S.* A Practical Split-Window Algorithm for Estimating Land Surface Temperature from Landsat 8 Data // Remote Sens. 2015. V. 7. № 1. P. 647–665.

García-Santos V., Cuxart J., Martínez-Villagrasa D., Jiménez M.A., Simó G. Comparison of three methods for estimating land surface temperature from Landsat 8-TIRS sensor data // Remote Sens. 2018. V. 10. № 9. P. 1450.

Gornyy V.I., Lyalko V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Filippovich V.E., Stankevich S.A., Brovkina O.V., Kiselev A.V., Davidan T.A., Lubsky N.S., Krylova A.B. Prognoz teplovoj reakcii gorodskoj sredy Sankt-Peterburga i Kieva na izmenenie klimata (po materialam s"emok sputnikami EOS i Landsat) [Forecast of Saint-Petersburg and Kiev thermal replies on climate change (on the basis of EOS and Landsat satellite imagery)] // Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2016. V. 13. № 2. P. 176–191 (In Russian).

*Kazakov E.E., Borisova Y.I.* Ocenka primenimosti algoritma atmosfernoj korrekcii SREM dlya analiza vremennyh ryadov na primere dannyh Landsat i ego otkrytaya programmnaya realizaciya [Evaluation of the SREM atmospheric correction algorithm applicability to time series analysis using Landsat data example and its open source software implementation] // Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2020. V. 17. N2. P. 30–39 (In Russian).

*Keeratikasikorn C., Bonafoni S.* Urban heat island analysis over the land use zoning plan of Bangkok by means of Landsat 8 imagery // Remote Sens. 2018. V. 10.  $\mathbb{N}_{2}$  3. P. 440.

*Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F.* Radiacionnyj balans Zemli kak indikator global'nogo ekologicheskogo ravnovesiya [Earth's Radiation Budget as an Indicator of Global Eco-

logical Equilibrium] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2006. № 1. P. 3–9 (In Russian).

*Kritsuk S.G., Gornyy V.I., Latypov I.S.* Povyshenie detal'nosti sputnikovogo kartografirovaniya teplofizicheskih harakteristik zemnoj poverhnosti [Spatial resolution improvement of satellite mapping of thermal properties of land surface] // Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2016. V. 13. № 5. P. 277– 290 (In Russian).

*Li Z.L., Tang B.H., Wu H., Ren H., Yan G., Wan Z., Trigo I.F., Sobrino J.A.* Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives // Remote Sens. Environ. 2013. V. 131. P. 14–37.

*Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L.* The interpretation of spectral vegetation indexes // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1995. V. 33. № 2. P. 481–486.

*Olioso A., Mira M., Courault D., Marloie O., Guillevic P.* Impact of surface emissivity and atmospheric conditions on surface temperatures estimated from top of canopy brightness temperatures derived from Landsat 7 data // 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'13). 21–26 July 2013. Melbourne, Australia, 2013. P. 3033–3036.

*Perez Hoyos I.C.* Comparison between land surface temperature retrieval using classification based emissivity and NDVI based emissivity // International J. Recent Development in Engineering and Technology. 2014. V. 2. № 2. P. 26–30.

*Ren H., Du C., Liu R., Qin Q., Yan G., Li Z.L., Meng J.* Atmospheric water vapor retrieval from Landsat 8 thermal infrared images // J. Geophys. Res: Atmos. 2015. V. 120. № 5. P. 1723–1738.

*Rozenstein O., Qin Z., Derimian Y. Karnieli A.* Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm // Sensors. 2014. V. 14. № 4. P. 5768–5780.

*Sekertekin A., Bonafoni S.* Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation // Remote Sens. 2020. V. 12. P. 294.

*Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L.* Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5 // Remote Sens. Environ. 2004. V. 90. P. 434–440

Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Sòria G., Romaguera M., Guanter L., Moreno J., Plaza A., Martínez P. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2008. V. 46. № 2. P. 316–327.

Son N.T., Chen C.F., Chen C.R., Chang L.Y., Minh V.Q. Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data // Int. J. Appl. Earth Obs. 2012. V. 18. P. 417–427.

Stankevich S.A., Filipovich V.E., Lubsky N.S., Krylova A.B., Kritsuk S.G., Brovkina O.V., Gornyy V.I., Tronin A.A. Interkalibraciya metodov vosstanovleniya termodinamicheskoj temperatury poverhnosti urbanizovannoj territorii po materialam teplovoj kosmicheskoj s"emki [Intercalibration of methods for the land surface thermodynamic temperature retrieving inside urban area by thermal infrared satellite imaging] // Ukrainian J. Remote Sensing. 2015. №. 7. P. 12– 21 (In Russian). *Tronin A.A., Gorny V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.S.* Spektral'nye metody distancionnogo zondirovaniya v geologii. Obzor [Spectral remote sensing for mineral exploration. A review] // Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2011. V. 8. № 4. P. 23–36 (In Russian).

*Uspenskii A.B., Kukharskii A.V., Uspenskii S.A.* Validaciya rezul'tatov sputnikovogo monitoringa temperatury poverhnosti sushi [Validation of the results of the satellite monitoring of land surface temperature] // Meteorologiya i gidrologiya. 2015. № 2. P. 81–95 (In Russian).

*Volkova E.V., Uspensky S.A.* Distancionnoe opredelenie temperatury podstilayushchej poverhnosti, prizemnoj temperatury vozduha i effektivnoj temperatury po sputnikovym dannym dlya yuga Evropejskoj territorii Rossii [Land surface, land air and effective temperature estimation for territories of Southern European Russia based on satellite data] // Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2016. V. 13. № 5. P. 291–303 (In Russian). *Walawender J.P., Hajto M.J., Iwaniuk P.* A new ArcGIS toolset for automated mapping of land surface temperature with the use of LANDSAT satellite data // 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'12). 22–27 July 2012. Munich, Germany, 2012. P. 4371–4374.

*Wang L., Lu Y. Yao Y.* Comparison of Three Algorithms for the Retrieval of Land Surface Temperature from Landsat 8 Images // Sensors. 2019. V. 19. P. 5049.

*Yu X., Guo X., Wu Z.* Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS-comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method // Remote Sens. 2014. V. 6. P. 9829–9852.

*Zhu Z., Wang S., Woodcock C.E.* Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images // Remote Sens. Environ. 2015. V. 159. P. 269–277.

# \_\_\_\_ ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА. \_\_\_\_\_ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ, СИСТЕМЫ И ПРОГРАММЫ ИЗК

# СОПОСТАВЛЕНИЕ НАЗЕМНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ РАЗНОМАСШТАБНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДОВ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ ДЛЯ ЗИМНИХ УСЛОВИЙ

© 2021 г. М. И. Варенцов<sup>а, с, е, \*</sup>, М. Ю. Грищенко<sup>b, d</sup>, П. И. Константинов<sup>b, e</sup>

<sup>а</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

<sup>b</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

<sup>с</sup>Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>d</sup>Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики",

факультет географии и геоинформационных технологий, Москва, Россия

 $^e$ Центр смарт-технологий устойчивого развития городских экосистем в условиях глобальных изменений РУДН,

Москва, Россия

\**E-mail: mvar91@gmail.com* Поступила в редакцию 26.08.2020 г.

Статья посвящена сравнению трех подходов к изучению микроклимата территории на примере городов Российской Арктики в зимних условиях: по данным тепловых космических снимков высокого пространственного разрешения со спутника Landsat 8 (1); по данным космических снимков низкого разрешения съемочной системы MODIS (2) и по данным прямых измерений температуры приземного слоя воздуха (3). В качестве последних использованы наблюдения автоматических метеостанций и термодатчиков сети UHIARC (Urban Heat Island Arctic Research Campaign) и метеостанций Росгидромета. Рассмотрено два способа расчета температуры земной поверхности по снимкам со спутника Landsat 8: с применением атмосферной коррекции снимков с использованием молели переноса излучения MODTRAN и заланием табличных значений коэффициентов излучения для различных типов поверхности, и без атмосферной коррекции. Работа проведена на примере городов Апатиты, Воркута, Салехард, Надым и Новый Уренгой. Показано, что значения температуры поверхности, рассчитанные по снимкам со спутника Landsat 8 без использования атмосферной коррекции, согласуются с данным MODIS и данными наблюдений лучше, чем результаты расчетов с использованием атмосферной коррекции. Это указывает на неопределенность задания коэффициента излучения поверхности. Для ряда случаев показано, что пространственная изменчивость температуры поверхности и воздуха тесно связаны, причем оба вида данных показывают наличие эффекта городского острова тепла с разностью температуры между городом и окрестностями до 4°С в дневное время суток. Такие результаты принципиально отличаются от результатов, полученных ранее для более низких широт, и указывают на перспективность использования космических данных высокого разрешения для картографирования и исследования микроклимата арктических городов в зимних условиях.

*Ключевые слова*: климат города, городской остров тепла, Landsat, MODIS, дистанционное зондирование, тепловые космические снимки, атмосферная коррекция, микроклимат, коэффициент излучения, Арктика

DOI: 10.31857/S0205961421020093

## **ВВЕДЕНИЕ**

Температура воздуха и подстилающей поверхности являются важнейшими параметрами окружающей среды. Востребованной, но не имеющей на настоящий момент универсального решения задачей является получение детализированных температурных данных для исследований на локальном пространственном масштабе (Shahraiyni, Sodoudi, 2017). Данная задача особенно актуальна для урбанизированных территорий, характеризующихся высокой термической неоднородностью и локальными климатическими особенностями, такими как городской остров тепла (далее – ОТ) (Ландсберг, 1983; Oke et al., 2017). Детализированные температурные данные необходимы как для фундаментальных исследований городского климата, так и для учета его особенностей в прикладных задачах – например, при оценке условий термического комфорта населения (Ho et al., 2016; Shandas et al., 2019), в эпидемиологических исследованиях (Mironova et al., 2019), в градостроительном планировании (Svensson, Eliasson, 2002). Перспективным источником детализированных температурных данных являются тепловые космические снимки высокого разрешения (Weng, 2009). Однако их использование требует решения ряда методологических вопросов, касающихся как их обработки, так и интерпретации результатов. В частности, важно учитывать различия между температурой приземного воздуха, определяемой обычно для высоты 2 м над поверхностью (далее – SAT, от англ. Surface Air Temperature), и восстанавливаемой по спутниковым данным температурой земной поверхности (далее – LST, от англ. Land Surface Temperature). Эти параметры очевидным образом взаимосвязаны, однако их связь имеет крайне сложный характер и зависит от множества факторов, включая свойства поверхности, время суток, сезон года и синоптические условия. Как следствие, картина ОТ по наземным и космическими данным может существенно различаться (Mathew et al., 2018; Niclos et al., 2014; Varentsov et al., 2019).

Устойчивый рост научного и общественного интереса к исследованиям в области городской климатологии и смежных наук отмечается в последние десятилетия. В настоящему времени обширные знания в этой области получены для умеренных и тропических широт (Oke et al., 2017), однако высокие широты до недавнего времени были практически не охвачены такими исследованиями. Характерные физико-географические условия Арктики и субарктики – смена полярного дня и ночи, преобладание зимой устойчивой стратификации атмосферы (Wetzel, Brümmer, 2011; Климатические характеристики..., 1983) не позволяют вслепую экстраполировать на эти регионы знания о городском климате, полученные для более южных широт. Недавние исследования, выполненные для ряда городов Арктической зоны РФ по данным экспериментальных метеорологических наблюдений и тепловых космических снимков системы MODIS, позволили получить первые результаты о микроклимате северных городов и их островах тепла, ярко выраженных в зимний сезон (Варенцов и др., 2014; Константинов и др., 2015; Konstantinov et al., 2018; Miles, Esau, 2017; Varentsov et al., 2018). Однако вопрос о взаимосвязи наземных и космических температурных данных для городов высоких широт ранее не изучался детально, что осложняет интерпретацию и обобщение результатов, полученных различными способами. Кроме того, в предшествующих работах не рассматривался опыт использования тепловых космических снимков высокого разрешения, наиболее перспективных для изучения пространственной изменчивости температуры на внутригородском масштабе.

Целью данной работы является оценка применимости космических температурных данных высокого разрешения для исследования микроклимата городов Арктической зоны РФ для зимних условий путем их сопоставления с космическими данными низкого разрешения и результатами контактных наблюдений температуры приземного воздуха.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

#### Регионы исследования

Рассматриваемые города включают Апатиты (Мурманская область), Воркуту (республика Коми), Салехард, Надым и Новый Уренгой (Ямало-Ненецкий автономный округ). Их объединяет расположение в высоких широтах (севернее полярного круга или вблизи него), схожесть размера, численности населения (от 45 тыс. человек в Надыме до 115 в Новом Уренгое) и характера застройки. Жилая часть городов плотно застроена многоэтажными домами высотой в 5–9 этажей. к ней примыкают территории промышленных предприятий. В Салехарде также представлена застройка частными малоэтажными домами. Различаются города, в первую очередь, условиями вмещающего рельефа. Город Апатиты расположен в холмистом рельефе, между Хибинскими горами и оз. Имандра. Воркута, Салехард и Новый Уренгой расположены на берегах рр. Воркута, Обь и Седэяха соответственно, поэтому неоднородность рельефа тоже присутствует. Надым расположен на равнинной территории в окружении практически плоского рельефа. Для каждого из регионов область исследования включает в себя сам город и окружающую его территорию размером примерно 20 × 20 км.

## Данные наблюдений за температурой воздуха

Нами использованы данные наблюдений за температурой воздуха, выполненные в рассматриваемых городах в рамках кампании UHIARC (Urban Heat Island Arctic Research Campaign) (Konstantinov et al., 2018; Varentsov et al., 2018) B 2016-2018 гг. Программа измерений UHIARC включает установку в центральной части каждого из городов (кроме Нового Уренгоя) стационарно работающей автоматической метеостанции (далее – AMC) Davis Vantage Pro 2, а также развертывание сети термодатчиков iButton в городе и его окрестностях на продолжительный период (более 1 мес. в зимний сезон). Измерения выполняются на стандартной высоте 2 м над поверхностью (АМС установлены на специальных опорах, термодатчики — на ветвях деревьев и кустарников). Также использованы наблюдения за температурой воздуха на расположенных за городской чертой метеостанциях Росгидромета (далее – MC). Дискретность измерений составляет 5 мин для AMC, 1 ч для термодатчиков и 3 ч для метеостанций Росгидромета (6 ч в Апатитах).

Для анализа выбраны периоды, когда для каждого города проводились наиболее детальные наблюдения с использованием термодатчиков iButton: зима 2016–2017 гг. для Надыма и Нового Уренгоя, февраль 2017 г. для Воркуты и Салехарда, зима 2017–2018 гг. для г. Апатиты. Данные наблюдений за температурой воздуха доступны для Надыма для 15 точек (MC, AMC, 13 термодатчиков); в Салехарде и Воркуте – в 9 точках (MC, AMC, 7 термодатчиков); в Апатитах – в 23 точках (MC, AMC, 21 термодатчик); в Новом Уренгое – в 6 точках (MC и 5 термодатчиков).

#### Космические данные высокого разрешения

Новизна данного исследования заключается в использовании температурных данных, полученных в результате обработки тепловых космических снимков высокого пространственного разрешения со спутника Landsat 8. Данный спутник запущен в 2013 г. и проводит съемку поверхности Земли в каналах оптического и среднего инфракрасного диапазона (съемочная система OLI). а также в двух каналах теплового инфракрасного диапазона (съемочная система TIRS). Съемочная система TIRS фиксирует собственное излучение объектов в диапазоне 10.6-12.5 мкм. Пространственное разрешение регистрируемых снимков составляет 100 м. Снимки представлены в открытом доступе на портале Геологической службы CIIIA (https://earthexplorer.usgs.gov/).

Работа со спутниковыми данными Landsat осложняется отсутствием общепринятого алгоритма расчета LST. Нами использован одноканальный алгоритм расчета LST по данным 10-го канала космических снимков со спутника Landsat 8 с атмосферной коррекцией (Грищенко, Чернулич, 2019). Одноканальный алгоритм предполагает меньшую точность результата расчета, чем алгоритм расщепленного окна прозрачности, но сильно выигрывает в простоте расчетов. Необходимые для коррекции параметры атмосферы определены по модели радиационного переноса MODTRAN в рамках инструмента Atmospheric Correction Parameter Calculator (http://atmcorr.gsfc.nasa.gov; Barsi et al., 2005) с использованием вертикальных профилей температуры и влажности по данным реанализа NCEP/NCAR для нижних 30 км и стандартных значений по модели "mid-latitude winter" выше 30 км.

Определение LST по снимкам Landsat требует задания коэффициента излучения ( $\sigma$ ), зависящего от свойств поверхности (Горный и др., 1993; Криксунов, 1978; Станкевич и др., 2015). Значения σ обычно определяются либо по результатам классификации объектов с последующим присвоением каждому объекту табличных значений, либо на основе вегетационного индекса NDVI (Чинь и др., 2015). Второй метод, очевидно, не применим для заснеженных арктических ландшафтов. В данной работе значение о задавалось по результатам автоматизированного дешифрирования многозональных космических снимков методом максимального правдоподобия с выделением заснеженных поверхностей без древесной растительности, заснеженных поверхностей с древесной растительностью, техногенных объектов (рис. 1). Каждому их этих типов поверхности назначены значения о согласно (Криксунов, 1978): 0.90, 0.92, 0.93 соответственно. Далее эти значения использовались в модуле атмосферной коррекции.

Естественным образом возникает предположение о неэффективности использования такого алгоритма атмосферной коррекции для рассматриваемых условий, как по причине несоответствия стандартных моделей атмосферы условиям высоких широт, так и ввиду объективных сложностей определения коэффициента излучения в зимних условиях, когда пространственная дифференциация спектральных характеристик земной поверхности существенно снижается из-за снежного покрова. Поэтому мы осуществили два способа расчета LST – с использованием атмосферной коррекции и без нее (в последнем случае не учитывается ослабление излучения атмосферой, и принимается  $\sigma = 1$ )

#### Космические данные низкого разрешения

С целью проверки репрезентативности значений LST, определяемых по спутниковым снимкам высокого разрешения, проведено их сравнение с данными низкого пространственного разрешения (1 км), полученными по спутниковым снимкам съемочной системы MODIS. Данные MODIS содержат значения LST, рассчитанные по алгоритму расщепленного окна прозрачности с учетом атмосферной коррекции с подбором адекватной модели атмосферы. Эти данные многократно верифицированы по результатам контактных измерений; их погрешность составляет менее  $2^{\circ}$ С (Wan et al., 2004) и менее  $1^{\circ}$ С в большинстве случаев в диапазоне температур от -10 до  $50^{\circ}$ C (Wan, 2014). Нами использованы данные, полученные в результате съемки со спутника Terra, а именно растры MOD11A1, доступные на портале NASA Earth Data (https://earthdata.nasa.gov/). Для регионов исследования время регистрации снимков со спутников Terra и Landsat 8 практически совпадает и составляет около полудня по местному времени.



**Рис. 1.** Результат классификации многозонального снимка съемочной системы OLI (спутник Landsat 8) за 7 марта 2018 г. для территории г. Апатиты (справа) с выделением техногенных объектов (*1*), участков древесной и кустарниковой растительности (*2*) и открытых заснеженных участков (*3*) в сравнении со спутниковым снимком за летний сезон по данным Google Maps (слева). Пунктирной линией показана граница урбанизированной территории, сплошной черной линией – границы наиболее крупных водных объектов.

При анализе данных MODIS в ряде случаев были выявлены систематические различия LST порядка  $1-2^{\circ}$ C для пикселей, имеющих различное время регистрации. Как правило, растр содержит пиксели со сроком регистрации в два различных момента времени, разнесенные на 1-1.5 ч. Ввиду сложности интерпретации такого смещения при анализе данных, введена специальная коррекция, зависящая от времени регистрации пиксела и минимизирующая среднюю по территории исследования разность LST между соседними пикселами с различным сроком регистрации.

#### Сравнение разнотипных данных

Сопоставление значений LST, рассчитанных двумя способами по спутниковым снимкам Landsat, с данными низкого разрешения MODIS и с данными наблюдений проведено для снимков района городов Апатиты (за 3 и 19 февраля 2018 г.), Салехард (6, 15 и 22 февраля 2017 г.), Воркута (20 февраля 2017 г.), Надым (за 25 января, 10, 12 и 26 февраля 2017 г.) и Новый Уренгой (29 января 2017 г.). Столь небольшая выборка случаев связана с низкой частотой регистрации спутниковых снимков Landsat (1 раз в 8 дней), значительная часть которых непригодна для использования изза высокой повторяемости облачной погоды в высоких широтах. Ввиду малого количества снимков для каждого города, все случаи рассматриваются как единая выборка данных. Для сравнения с данными MODIS использованы значения LST, осредненные в пределах пикселов растра с

более грубым разрешением. Для сравнения с данными наблюдений использованы средние значения LST по квадрату 3 × 3 пиксела в окрестностях точки наблюдений.

Задачу сравнения спутниковых данных с данными наблюдений осложняет отсутствие затенения термодатчиков iButton, из-за чего они днем нагреваются на солнце, а их показания искажаются (Malevich, Klink, 2011; Ojeh et al., 2016). Возникающая погрешность становится существенна при высоте солнца над горизонтом  $h > 4^{\circ}$  (Konstantinov et al., 2018). В микроклиматических исследованиях периоды с  $h > 4^{\circ}$  можно исключить из рассмотрения при анализе наблюдений термодатчиков, однако эта проблема выходит на первый план при их сравнении со спутниковыми данными, поскольку снимки Landsat perистрируются в районе полудня по местному времени. Для решения данной проблемы, при сравнении значений LST с наблюдениями термодатчиков, использовались следующие значения температуры:

$$T = \min(T_{fact}, T_{int}),$$

где  $T_{fact}$  — фактическая температура, зарегистрированная термодатчиком в ближайший к сроку регистрации спутникового снимка момент времени,  $T_{int}$  — температура, интерполированная на этот момент времени по двум ближайшим измерениям при  $h < 4^{\circ}$ . Для наблюдений АМС бралось значение, ближайшее к сроку регистрации снимка. Для метеостанций Росгидромета проводилась интерполяция значений, измеренных в

Регион	Дата	ME [°C]		RMSE [°C]		R		Доля лакун
		AC	noAC	AC	noAC	AC	noAC	(MODIS)
Amomymy	03.02.2018	2.4	-0.6	3.6	2.1	0.25	0.47	0.08
Апатиты	19.02.2018	2.5	-0.7	3.2	1.7	0.49	0.61	0.04
	06.02.2017	3.4	1.6	3.8	2.2	0.36	0.46	0.27
Салехард	16.02.2017	0.1	0.6	1.4	1.4	0.64	0.72	0.69
	22.02.2017	2.9	1.4	3.0	1.5	0.66	0.73	0.62
Воркута	20.02.2017	4.9	0.0	5.0	0.7	0.62	0.72	0.31
Надым	25.01.2017	2.8	-0.1	2.9	0.6	0.48	0.51	0.12
	10.02.2017	3.0	0.5	3.2	0.8	0.21	0.55	0.71
	12.02.2017	1.8	-0.8	2.1	1.5	0.36	0.38	0.19
	26.02.2017	4.0	1.1	4.3	1.6	-0.10	0.06	0.31
Новый Уренгой	29.01.2017	5.0	0.6	5.0	0.8	0.71	0.76	0.01
Среднее значение		3.0	0.3	3.4	1.4	0.42	0.54	

**Таблица 1.** Характеристики сравнения значений LST по данным Landsat, рассчитанных с атмосферной коррекцией (столбцы AC) и без нее (столбцы noAC), и по данным MODIS: средняя ошибка ME, среднеквадратическая ошибка RMSE, коэффициент пространственной корреляции *R* 

сроки с дискретностью 3 или 6 ч, на срок регистрации снимка.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

# Сравнение спутниковых данных высокого и низкого разрешения

Сравнение LST по данным MODIS со значениями, рассчитанными по снимкам Landsat, показало, что при использовании атмосферной коррекции согласие между двумя видами данных значительно хуже, чем без нее. Во-первых, при использовании коррекции возникает систематическое завышение LST по данным Landsat относительно данных MODIS в среднем на 3°С (табл. 1). Без использования коррекции систематическое смещение близко к нулю, а среднеквадратические ошибки значительно меньше. Во-вторых, пространственное распределение значений LST, рассчитанных без коррекции, лучше согласуется с данными MODIS, что подтверждают значения коэффициентов пространственной корреляции *R* в табл. 1, примеры на рис. 2, а также разброс точек на диаграммах рассеяния на рис. 3. Низкая пространственная корреляция в ряде случаев отчасти связана со значительным количеством лакун (пробелов) в данных MODIS. Несмотря на отсутствие облачности на снимках Landsat, по неочевидным причинам на снимках MODIS для той же территории лакуны занимают до 70% площади (табл. 1).

Безусловно, данные MODIS не являются эталоном. Тем не менее, сравнение значений LST на рис. 2 показывает, что при использовании атмосферной коррекции в поле LST возникают артефакты, которые не согласуются с данными MODIS и необъяснимы с позиций микроклиматологии. Например, это резкие контрасты в поле LST между залесенными и открытыми заснеженными территориями и положительные аномалии LST для последних (например, к северо-западу от г. Надым, на юго-западе от г. Апатиты, на юге от г. Новый Уренгой). Для открытых заснеженных пространств зимой стоит ожидать, напротив, более низких значений температуры по сравнению с лесными массивами (Rouse, 1984). Представляется нереалистичной повышенная температура поверхности рек и озер, закрытых зимой толстым льдом (р. Надым, р. Седэяха, оз. Янтарное к югу от Надыма) и представляющих собой такие же открытые заснеженные пространства. К тому же, они находятся в низинах, где в условиях устойчивой стратификации атмосферы скапливается холодный воздух (Daly et al., 2010; Varentsov et al., 2018).

Данные LST, рассчитанные по снимкам со спутника Landsat 8 без коррекции, напротив, хорошо отражают типичные микроклиматические особенности территории: более низкие температуры в низинах, например в долине р. Надым, и более высокие температуры на сопках к югу от Надыма и в окрестностях г. Апатиты. Зимой в высоких широтах характерны температурные инверсии (Wetzel, Brümmer, 2011; Климатические характеристики..., 1983), из-за чего на возвышенностях оказывается теплее, чем в низинах. Для всех городов прослеживаются положительные аномалии LST для застроенных территорий, характеризующие поверхностный ОТ, с разностью



**Рис. 2.** Значения температуры поверхности (LST) по данным Landsat, рассчитанные с атмосферной коррекцией (слева) и без нее (по центру), и по данным MODIS (слева) на примерах для городов Апатиты (*a*), Надым (*б*) и Новый Уренгой (*в*). Пунктирной линией показана граница урбанизированной территории, сплошной черной линей — границы наиболее крупных водных объектов.

температуры между городом и окружающими ландшафтами до 3–4°С. При этом данные Landsat ожидаемо значительно лучше разрешают пространственную структуру городской температурной аномалии, включая внутригородскую изменчивость LST.

Существенные различия, выявленные между результатами расчета LST по данным Landsat с ат-



**Рис. 3.** Сравнение значений температуры поверхности (LST) по данным MODIS и Landsat, рассчитанных с атмосферной коррекцией (красные точки) и без нее (синие точки) для трех случаев, соответствующих рис. 2 (a-e), и для всех 11 рассмотренных случаев (e). На графиках указаны значения коэффициента детерминации тренда  $R^2$  и средней ошибки ME.

мосферной коррекцией и без нее, могут быть связаны с двумя факторами. Во-первых, можно предположить некорректность задания коэффициента излучения σ в процедуре атмосферной коррекции. Используемые при обработке снимков значения 0.9-0.93 существенно меньше, чем оценка σ по данным MODIS, которая в большинстве случаев близка к 0.99 (растры emis31, emis32 продукта MOD11A1). Разность средних значений σ в значительной степени объясняет систематическое завышение LST относительно данных MODIS при использовании атмосферной коррекции. Точная оценка σ для заснеженной поверхности остается сложной задачей ввиду большого количества влияющих на нее факторов. В литературе оценки σ для снега варьируются от 0.8 (Горный и др., 1993) до близких к единице значений (Hori et al., 2006; Warren, 1982), т.е. в ряде случаев излучательные свойства снега близки к свойствам абсолютно черного тела. Последнее подтверждает релевантность значений о по данным MODIS.

Во-вторых, при атмосферной коррекции учитывается ослабление излучения столбом атмосферы. Параметры атмосферы, определяемые в рамках инструмента NASA по данным реанализа NCEP/NCAR (Barsi et al., 2005), также могут быть неточны. Однако, даже для пыльной и влажной атмосферы тропиков, чувствительность процедуры коррекции к входным параметрам атмосферы значительно ниже, чем к величине  $\sigma$  (Rosas et al., 2017). С учетом низкого содержания водяного пара и высокой прозрачности зимней атмосферы высоких широт, в нашем случае чувствительность процедуры коррекции к параметрам атмосферы должна быть еще меньше. Значения LST, рассчитанные с атмосферной коррекцией и постоянной  $\sigma = 1$ , отличаются от рассчитанных без коррекции в среднем на 0.5°С. Эта величина сопоставима к чувствительности к изменению о на 0.01 (при температуре −30°С она составляет ≈0.6°). Таким образом, если принять диапазон неопределенности оценки σ как 0.9–1.0. это будет эквивалентно неопределенности оценки LST в 6°С, что сопоставимо с масштабом ее микроклиматической изменчивости в зимний период. Таким образом, проблема точной оценки о выходит на первый план при использовании снимков со спутников серии Landsat для исследования микроклимата в высоких широтах в зимний период.

#### Сравнение спутниковых данных высокого разрешения и наблюдений

Сравнение значений LST, рассчитанных по снимкам Landsat без атмосферной коррекции, с данными контактных наблюдений за температурой воздуха (SAT) в городах и их окрестностях в 9 из 11 случаев показало наличие выраженной взаимосвязи между этими величинами с коэффициентами корреляции *R* от 0.48 до 0.90 (табл. 2). Среднее значение *R* составило 0.59 и 0.69 в среднем для 9 случаев с выраженной связью между LST и SAT. Значения LST, рассчитанные с атмосферной коррекцией, характеризуются менее тесной связью с SAT (табл. 2). Это подтверждает предположение о том, что выбранный метод задания пространственно-дифференцируемых значе-

Таблица 2. Характеристики сравнения LST по данным спутника Landsat 8, рассчитанных с атмосферной коррекцией (столбцы AC) и без нее (столбцы поAC), с температурой воздуха SAT по данным наблюдений: средняя ошибка ME, среднеквадратическая ошибка RMSE, коэффициент пространственной корреляции *R*. Средние значения рассчитаны по всем случаям и, отдельно, по 9 случаям, для которых прослеживается взаимосвязь SAT и LST (исключая 2 случая, выделенных серой заливкой)

Регион	Дата	ME [°C]		RMSE [°C]		R	
		AC	noAC	AC	noAC	AC	noAC
	03.02.2018	2.0	-0.9	2.3	1.2	0.84	0.87
Апатиты	19.02.2018	3.0	-0.4	3.3	1.3	0.87	0.90
	06.02.2017	0.4	-0.8	1.0	1.0	0.49	0.48
Салехард	16.02.2017	-7.1	-6.4	7.3	6.5	-0.04	-0.04
	22.02.2017	1.4	0.0	1.8	1.3	0.71	0.71
Воркута	20.02.2017	1.1	-3.1	1.4	3.4	0.51	0.64
	25.01.2017	2.4	-0.5	2.6	0.9	0.24	0.49
Надым	10.02.2017	3.5	0.6	3.6	0.8	0.56	0.80
	12.02.2017	-0.3	-3.2	1.7	3.5	0.64	0.69
	26.02.2017	-1.4	-4.2	1.7	4.3	-0.12	0.13
Новый Уренгой	29.01.2017	0.1	-3.3	0.8	3.4	0.46	0.67
Среднее (11 случаев)		0.5	-2.0	2.5	2.5	0.47	0.58
Среднее (9 случаев)		1.5	-1.3	2.0	1.9	0.59	0.69

ний  $\sigma$ , используемый при расчетах LST с атмосферной коррекцией, вносит нереалистичные искажения в поле температуры.

Значения LST, рассчитанные без коррекции, в среднем на 2°С ниже значений SAT, а при использовании коррекции, напротив, на 0.5°С выше. Для зимних условий высоких широт занижение температуры поверхности по сравнению с температурой воздуха представляется более реалистичным ввиду преобладания устойчивой стратификации атмосферы и отрицательного радиационного баланса. Дополнительное занижение LST может быть связано с использованием в расчетах без коррекции значения  $\sigma = 1$ . В отличие от снега, для которого значение о может быть близко к единице, для городских поверхностей типичные значения  $\sigma$  составляют около 0.9 (Oke et al., 2017). Соответственно, при использовании  $\sigma = 1$  значения LST для города должны быть занижены. Максимальны различия LST и SAT для тех же случаев, для которых минимальны коэффициенты корреляции между ними (16.02.2017 для Салехарда и 26.02.2017 для Надыма). Доступные данные не позволяют однозначно интерпретировать причины несогласованности LST и SAT в этих случаях: она может быть связана с особенностями атмосферных процессов, аномалиями оптических свойств заснеженной поверхности и другими факторами. Для оставшихся 9 случаев средняя разность LST и SAT составляет -1.3°С.

SAT оба вида данных отражают характерные микроклиматические особенности исследуемых территорий, включая эффект ОТ (рис. 4). Это видно и на примере окрестностей г. Апатиты с ярко выраженной пространственной изменчивостью загородных температур, так и на примере Салехарда, Надыма и Воркуты, где эффект ОТ выражен более отчетливо на фоне меньшей изменчивости загородных температур. Для региона г. Апатиты оба вида данных показывают характерное превышение температуры на холмах над низинами (Varentsov et al., 2018), а также направленный с востока на запад градиент температуры. Эффект ОТ г. Апатиты, который расположен на одном из холмов, выражен в превышении температуры в центре города на 2-4°С по сравнению с незастроенной частью холма на востоке от города. На примерах для Салехарда и Надыма оба вида данных показывают ОТ с разностью температуры в 3-4°С между городским и загородными точками наблюдений. Для сравнения, типичные экстремумы разности температуры воздуха между городом и окрестностями по данным продолжительных наблюдений UHIARC в этих городах составляют 4— 5°С, абсолютные максимумы – около 7°С (Копstantinov et al., 2018). Пример Воркуты менее удачный ввиду малого числа точек изменений и систематического завышения SAT по сравнению с LST, однако и в этом случае оба типа данных указывают на превышение температуры в городе по сравнению с окрестностями.

Для случаев с наиболее тесной связью LST и



**Рис. 4.** Примеры сравнения LST по данным снимков Landsat с данными контактных измерений температуры воздуха (SAT) для района г. Апатиты за 19.02.2018 (*a*); района г. Салехарда за 22.02.2017 (*b*); района г. Воркута за 20.02.2017; района г. Надым за 10.02.2017 (*c*). Значения LST показаны цветной заливкой, значения SAT по данным AMC и MC – круглыми пунсонами, по данным термодатчиков iButton – квадратными. На графиках-врезках показано сравнение значений LST и SAT в городских (красные) и загородных (синие) точках наблюдений, пунктирной линией показан линейный тренд, указаны значения коэффициента детерминации тренда *R*<sup>2</sup> и систематическое смещение ME.

Таким образом, рассмотренные примеры показывают, что для зимних условий высоких широт закономерности распределения температуры воздуха и поверхности в городах и их окрестностях в значительной степени согласованы даже в дневные часы. Такой результат разительно отличается от результатов аналогичных исследований для летних условий более южных широт, показы-
вающих несогласованность значений LST и SAT и пространственной картины ОТ в поле этих величин в дневное время суток (Sheng et al., 2017; Sun et al., 2015; Xiong, Chen, 2017). Так, летним днем разность значений LST в городе и пригородах может достигать десятков °С, но разность значений SAT обычно не превышает 1.5–2°С за счет интенсивного вертикального перемешивания в пограничном слое атмосферы (Varentsov et al., 2019; Voogt, Oke, 2003). Принято считать, что взаимосвязь между городскими аномалиями SAT и LST лучше в ночных условиях. Однако зимой в высоких широтах низкая высота солнца, короткий световой день и высокое альбедо снежного покрова препятствуют существенному прогреву поверхности и формированию перемешенного пограничного слоя атмосферы, благордаря чему даже в дневные часы может сохраняться тесная связь между температурой воздуха и поверхности, что и демонстрируют результаты исследования.

#### выводы

Выполненное исследование позволяет сделать два важных вывода о перспективах использования космических температурных данных высокого пространственного разрешения в фундаментальных и прикладных микроклиматических исследованиях для урбанизированных территорий высоких широт.

Во-первых, в отличие от умеренных и тропических широт, зимой в высоких широтах, в условиях слабого солнечного нагрева и преобладания устойчивой стратификации атмосферы, пространственное распределение температуры воздуха и поверхности в значительной степени согласовано даже в дневные часы. Также согласуются и характеристики ОТ в поле этих величин. Это упрощает задачу сопоставления результатов микроклиматических исследований, выполненных по данным прямых измерений и космических снимков, и открывает перспективы использования космических снимков высокого разрешения со спутников серии Landsat, регистрируемых в дневное время суток, в задачах картографирования и исследования городского микроклимата. В дальнейшем представляется перспективным использование таких снимков для более детального изучения пространственной изменчивости температуры на внутригородском масштабе.

Во-вторых, показана важность более аккуратного учета пространственной дифференциации коэффициента излучения поверхности (б) в подобных исследованиях для зимних условий. В нашем исследовании, при использовании табличных значений б для различных типов поверхности, полученные значения LST показали значительно худшее согласие с данными низкого разрешения MODIS и данными наблюдений за температурой воздуха по сравнению с результатами расчетов LST при задании  $\sigma = 1$ . Летом, когда пространственные различия LST достигают десятков °C, влияние способа задания  $\sigma$  не столь существенно, однако зимой неопределенность ее оценок оказывается соизмерима с характерным масштабом пространственной изменчивости LST. Соответственно, необходимость максимально точного задания  $\sigma$  выходит на первый план в задачах применения спутниковых данных высокого разрешения в микроклиматических исследованиях в зимний период.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 18-05-00715 A и 20-55-71004 Арктика т.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Варенцов М.И., Константинов П.И., Самсонов Т.Е., Репина И.А. Изучение феномена городского острова тепла в условиях полярной ночи с помощью экспериментальных измерений и дистанционного зондирования на примере Норильска // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 329–337.

Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.

*Грищенко М.Ю., Чернулич К.К.* Исследование связи наземных и космических температурных данных на примере островов Врангеля и Кунашир // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019. Т. 63. № 5. С. 566–575.

Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере: справочное пособие / под ред. Э.Ю. Безуглая, М.Е. Берлянд. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 328 с.

Константинов П.И., Грищенко М.Ю., Варенцов М.И. Картографирование островов тепла городов Заполярья по Совмещенным данным полевых измерений и космических снимков на примере г. Апатиты (Мурманская Область) // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 3. С. 27–33.

*Криксунов Л.3.* Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Советское радио, 1978. 400 с.

*Ландсберг Г.Е.* Климат города. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 246 с.

Станкевич С.А., Филиппович В.Е., Лубский Н.С., Крылова А.Б., Крицук С.Г., Бровкина О.В. Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съемки // Украинский журн. дистанционного зондирования Земли. 2015. Т. 7. С. 12–21.

Чинь Л.Х., Терехин Э.А., Ву З.Т. Дистанционные методы в изучении коэффициента излучения поверхности по данным многозональной съемки Landsat (на примере района Бак Бинь провинции Бинь Тхуан, Вьетнам) // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 59–68. *Barsi J.A., Schott J.R., Palluconi F.D., Hook S.J.* Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments // Earth Obs. Syst. X. 2005. V. 5882. P. 58820E.

https://doi.org/10.1117/12.619990

*Daly C., Conklin D.R., Unsworth M.H.* Local atmospheric decoupling in complex topography alters climate change impacts // Int. J. Climatol. 2010. V. 30. P. 1857–1864. https://doi.org/10.1002/joc.2007

Ho H.C., Knudby A., Xu Y., Hodul M., Aminipouri M. A comparison of urban heat islands mapped using skin temperature, air temperature, and apparent temperature (Humidex), for the greater Vancouver area // Sci. Total Environ. 2016. V. 544. P. 929–938.

https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.021

Hori M., Aoki T., Tanikawa T., Motoyoshi H., Hachikubo A., Sugiura K., Yasunari T.J., Eide H., Storvold R., Nakajima Y., Takahashi F. In-situ measured spectral directional emissivity of snow and ice in the 8–14  $\mu$ m atmospheric window // Remote Sens. Environ. 2006. V. 100. Nº 4. P. 486–502. https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.001

Konstantinov P., Varentsov M., Esau I. A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic // Environ. Res. Lett. 2018. V. 13. № 7. P. 75007. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacb84

*Malevich S.B., Klink K.* Relationships between snow and the wintertime Minneapolis urban heat island // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2011. V. 50. № 9. P. 1884–1894. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-05.1

*Mathew A., Khandelwal S., Kaul N.* Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities // Energy Build. 2018. V. 159. P. 271–295.

https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.062

*Miles V., Esau I.* Seasonal and Spatial Characteristics of Urban Heat Islands (UHIs) in Northern West Siberian Cities // Remote Sens. 2017. V. 9. № 10. P. 989. https://doi.org/10.2300/rs0100080

https://doi.org/10.3390/rs9100989

*Mironova V., Shartova N., Beljaev A., Varentsov M., Grishchenko M.* Effects of Climate Change and Heterogeneity of Local Climates on the Development of Malaria Parasite (Plasmodium vivax) in Moscow Megacity Region // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2019. V. 16. № 5. P. 694. https://doi.org/10.3390/ijerph16050694

Niclos R., Valiente J.A., Barbera M.J., Caselles V. Land Surface Air Temperature Retrieval From EOS-MODIS Images // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2014. V. 11. № 8. P. 1380–1384.

https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2293540

*Ojeh V., Balogun A., Okhimamhe A.* Urban-Rural Temperature Differences in Lagos // Climate. 2016. V. 4. № 2. P. 29. https://doi.org/10.3390/cli4020029

*Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A.* Urban climates. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 509 p. https://doi.org/10.1017/9781139016476

*Rosas J., Houborg R., McCabe M.F.* Sensitivity of Landsat 8 surface temperature estimates to atmospheric profile data: A study using MODTRAN in dryland irrigated systems // Remote Sens. 2017. V. 9. No 10. P. 1–27.

https://doi.org/10.3390/rs9100988

*Rouse W.R.* Microclimate at Arctic Tree Line 1. Radiation Balance of Tundra and Forest // Water Resour. Res. 1984.

V. 20. № 1. P. 57–66.

https://doi.org/10.1029/WR020i001p00057

Shahraiyni H.T., Sodoudi S. High-Resolution Air Temperature Mapping in Urban Areas // 2017. V. 21. № 6A. P. 2267– 2286.

https://doi.org/10.2298/TSCI150922094T

Shandas V., Voelkel J., Williams J., Hoffman J. Integrating satellite and ground measurements for predicting locations of extreme urban heat // Climate. 2019. V. 7. № 1. P. 5. https://doi.org/10.3390/cli7010005

Sheng L., Tang X., You H., Gu Q., Hu H. Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China // Ecol. Indic. 2017. V. 72. P. 738–746. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.009

*Sun H., Chen Y., Zhan W.* Comparing surface- and canopylayer urban heat islands over Beijing using MODIS data // Int. J. Remote Sens. 2015. V. 36. № 21. P. 5448–5465. https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1101504

Svensson M.K., Eliasson I. Diurnal air temperatures in builtup areas in relation to urban planning // Landscape and Urban Planning. 2002. V. 61. № 1. P. 37–54.

https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00076-2

Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., Esau I., Miles V., Davy R. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. № 23. P. 17573–17587. https://doi.org/10.5194/acp-18-17573-2018

Varentsov M.I., Grishchenko M.Y., Wouters H. Simultaneous assessment of the summer urban heat island in Moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling // Geogr. Environ. Sustain. 2019. V. 12.  $N_{0}$  4. P. 74–95.

https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-10

*Voogt J.A., Oke T.R.* Thermal remote sensing of urban climates // Remote Sens. Environ. 2003. V. 86. № 3. P. 370–384.

https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8

*Wan Z*. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product // Remote Sens. Environ. 2014. V. 140. P. 36–45.

https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.027

*Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., Li Z.L.* Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature // Int. J. Remote Sens. 2004. V. 25. № 1. P. 261–274. https://doi.org/10.1080/0143116031000116417

*Warren S.G.* Optical properties of snow // Rev. Geophys. 1982. V. 20. № 1. P. 67.

https://doi.org/10.1029/RG020i001p00067

Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2009. V. 64.  $N^{\circ}$  4. P. 335–344.

https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007

Wetzel C., Brümmer B. An Arctic inversion climatology based on the European Centre Reanalysis ERA-40 // Meteorol. Zeitschrift. 2011. V. 20. № 6. P. 589–600. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0295

*Xiong Y., Chen F.* Correlation analysis between temperatures from Landsat thermal infrared retrievals and synchronous weather observations in Shenzhen, China // Remote Sens. Appl. Soc. Environ. 2017. V. 7. P. 40–48. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.06.002

# Comparison between *In Situ* and Satellite Multiscale Temperature Data for Russian Arctic Cities for Winter Season

M. I. Varentsov<sup>1, 3, 5</sup>, M. Yu. Grischenko<sup>2, 4</sup>, and P. I. Konstantinov<sup>2, 5</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia <sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia <sup>3</sup>A.M. Obukhov Institute for Atmospheric Physics, Moscow, Russia <sup>4</sup>HSE University, Faculty of Geography and Geoinformatics, Moscow, Russia <sup>5</sup>RUDN University, Moscow, Russia

This study compares three approaches for spatially-resolving microclimatic research on the example of Russian Arctic cities in winter conditions: according to the high-resolution thermal images from the Landsat 8 satellite (1); according to low-resolution images of the MODIS imaging system (2) and from direct measurements of the surface air temperature (3). As the latter, observations of automatic weather stations and temperature sensors of the UHIARC (Urban Heat Island Arctic Research Campaign) network and Roshydromet weather stations were used. Two methods of the land surface temperature (LST) calculation from the Landsat 8 satellite images were considered: with atmospheric correction based on MODTRAN radiation transfer model and fixed emissivity values for different land cover types, and without atmospheric correction. The study was carried out for the cities of Apatity, Vorkuta, Salekhard, Nadym and Novy Urengoy. We show that the LST values calculated from Landsat 8 images without atmospheric correction agree with MODIS data and observations better than the results, obtained with atmospheric correction. Such result indicates an inaccuracy in setting the surface emissivity. For a number of cases it was shown that the spatial patterns of the LST and air temperature are closely related, and both types of data show the existence of the urban heat island effect with urban-rural temperature difference up to  $4^{\circ}$ C in the daytime. These results are fundamentally different from the previous results obtained for lower latitudes, which indicates the prospects of using highresolution satellite temperature data for mapping and further study of the microclimate of Arctic cities in winter conditions.

*Keywords*: urban climate, urban heat island, Landsat, MODIS, remote sensing, thermal satellite images, atmospheric correction, microclimate, emissivity, Arctic

#### REFERENCES

*Barsi J.A., Schott J.R., Palluconi F.D., Hook S.J.* Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments // Earth Obs. Syst. X. 2005. V. 5882. P. 58820E. DOI: 10.1117/12.619990

*Daly C., Conklin D.R., Unsworth M.H.* Local atmospheric decoupling in complex topography alters climate change impacts // Int. J. Climatol. 2010. V. 30. P. 1857–1864. DOI: 10.1002/joc.2007

Gornyj V.I., Shilin B.V., Jasinskij G.I. Teplovaja ajerokosmicheskaja sjemka. Moscow: Nedra, 1993. 128 p. (In Russian).

Grishchenko M.Y., Chernulich K.K. Studying the interrelation of spatial and ground temperature data, case of the Wrangel and Kunashir islands // Geod. Aerophotosurveying. 2019. V. 63. No 5. P. 566–575. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-5-566-575

*Ho H.C., Knudby A., Xu Y., Hodul M., Aminipouri M.* A comparison of urban heat islands mapped using skin temperature, air temperature, and apparent temperature (Humidex), for the greater Vancouver area // Sci. Total Environ. 2016. V. 544. P. 929–938. DOI: 10.1016/j.scito-tenv.2015.12.021

Hori M., Aoki T., Tanikawa T., Motoyoshi H., Hachikubo A., Sugiura K., Yasunari T.J., Eide H., Storvold R., Nakajima Y., Takahashi F. In situ measured spectral directional emissivity of snow and ice in the 8–14 µm atmospheric window // Remote Sens. Environ. 2006. V. 100. № 4. P. 486–502. DOI: 10.1016/j.rse.2005.11.001

Klimaticheskie harakteristiki uslovij rasprostranenija primesej v atmosfere: spravochnoe posobie / eds. Je. Ju. Bezuglaja, M.E. Berljand. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 328 p.

Konstantinov P.I., Grishchenko M.Y., Varentsov M.I. Mapping urban heat islands of arctic cities using combined data on field measurements and satellite images based on the example of the city of Apatity (Murmansk Oblast) // Izv. Atmos. Ocean Phys. 2015. V. 51. № 9. P. 992–998. DOI: 10.1134/S000143381509011X

Konstantinov P., Varentsov M., Esau I. A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic // Environ. Res. Lett. 2018. V. 13. № 7. P. 75007. DOI: 10.1088/1748-9326/aacb84

*Kriksunov L.Z.* Spravochnik po osnovam infrakrasnoj tehniki. Moscow: Sovetskoe radio, 1978. 400 p. (In Russian).

Landsberg G.E. Klimat goroda. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 246 p.

*Malevich S.B., Klink K.* Relationships between snow and the wintertime Minneapolis urban heat island // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2011. V. 50. № 9. P. 1884–1894. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-05.1.

*Mathew A., Khandelwal S., Kaul N.* Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities // Energy Build. 2018. V. 159. P. 271–295. DOI: 10.1016/j.enbuild. 2017.10.062

*Miles V., Esau I.* Seasonal and Spatial Characteristics of Urban Heat Islands (UHIs) in Northern West Siberian Cities // Remote Sens. 2017. V. 9. № 10. P. 989. DOI: 10.3390/rs9100989

*Mironova V., Shartova N., Beljaev A., Varentsov M., Grishchenko M.* Effects of Climate Change and Heterogeneity of Local Climates on the Development of Malaria Parasite (Plasmodium vivax) in Moscow Megacity Region // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2019. V. 16. № 5. P. 694. DOI: 10.3390/ijerph16050694

Niclos R., Valiente J.A., Barbera M.J., Caselles V. Land Surface Air Temperature Retrieval From EOS-MODIS Images // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2014. V. 11. № 8. P. 1380–1384. DOI: 10.1109/LGRS.2013.2293540

*Ojeh V., Balogun A., Okhimamhe A.* Urban-Rural Temperature Differences in Lagos // Climate. 2016. V. 4. № 2. P. 29. DOI: 10.3390/cli4020029

*Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A.* Urban climates. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 509 p. DOI: 10.1017/9781139016476

*Rosas J., Houborg R., McCabe M.F.* Sensitivity of Landsat 8 surface temperature estimates to atmospheric profile data: A study using MODTRAN in dryland irrigated systems // Remote Sens. 2017. V. 9. № 10. P. 1–27. DOI: 10.3390/rs9100988

*Rouse W.R.* Microclimate at Arctic Tree Line 1. Radiation Balance of Tundra and Forest // Water Resour. Res. 1984. V. 20. № 1. P. 57–66. DOI: 10.1029/WR020i001p00057

Shahraiyni H.T., Sodoudi S. High-Resolution Air Temperature Mapping in Urban Areas // 2017. V. 21. № 6A. P. 2267– 2286. DOI: 10.2298/TSCI150922094T

Shandas V., Voelkel J., Williams J., Hoffman J. Integrating satellite and ground measurements for predicting locations of extreme urban heat // Climate. 2019. V. 7. № 1. P. 5. DOI: 10.3390/cli7010005

Sheng L., Tang X., You H., Gu Q., Hu H. Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China // Ecol. Indic. 2017. V. 72. P. 738–746. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.09.009

Sun H., Chen Y., Zhan W. Comparing surface- and canopylayer urban heat islands over Beijing using MODIS data // Int. J. Remote Sens. 2015. V. 36. № 21. P. 5448–5465. DOI: 10.1080/01431161.2015.1101504

Stankevich S.A., Filippovich V.E., Lubskij N.S., Krylova A.B., Kricuk S.G., Brovkina O.V. Interkalibracija metodov vosstanovlenija termodinamicheskoj temperatury poverhnosti urbanizirovannoj territorii po materialam teplovoj kosmicheskoj sjomki // Ukrainskij zhurnal distancionnogo zondirovanija Zemli. 2015. V. 7. P. 12–21 (In Russian).

Svensson M.K., Eliasson I. Diurnal air temperatures in builtup areas in relation to urban planning // Landscape and Urban Planning. 2002. V. 61. № 1. P. 37–54. DOI: 10.1016/S0169-2046(02)00076-2

Trinh L.H., Terehin Je.A., Vu D.T. Application of remote sensing in determining land surface emissivity using LANDSAT multispectral imagery (case study: Bac Binh district, Binh Thuan province, Vietnam) (in Russian)// Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2015. V. 12. No 6. P. 59–68.

Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Samsonov T.E., Repina I.A. Investigation of the urban heat island phenomenon during polar night based on experimental measurements and remote sensing of Norilsk city // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2014. V. 11. № 4. P. 329–337 (In Russian).

Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., Esau I., Miles V., Davy R. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. № 23. P. 17573–17587. DOI: 10.5194/acp-18-17573-2018

*Varentsov M.I., Grishchenko M.Y., Wouters H.* Simultaneous assessment of the summer urban heat island in Moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling // Geogr. Environ. Sustain. 2019. V. 12. № 4. P. 74–95. DOI: 10.24057/2071-9388-2019-10

*Voogt J.A., Oke T.R.* Thermal remote sensing of urban climates // Remote Sens. Environ. 2003. V. 86. № 3. P. 370– 384. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00079-8

*Wan Z.* New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product // Remote Sens. Environ. 2014. V. 140. P. 36–45. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.027

Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., Li Z.L. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature // Int. J. Remote Sens. 2004. V. 25.  $\mathbb{N}$  1. P. 261–274. DOI: 10.1080/0143116031000116417

*Warren S.G.* Optical properties of snow // Rev. Geophys. 1982. V. 20. № 1. P. 67. DOI: 10.1029/RG020i001p00067

Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2009. V. 64. № 4. P. 335–344. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007.

Wetzel C., Brümmer B. An Arctic inversion climatology based on the European Centre Reanalysis ERA-40 // Meteorol. Zeitschrift. 2011. V. 20. № 6. P. 589–600. DOI: 10.1127/0941-2948/2011/0295

*Xiong Y., Chen F.* Correlation analysis between temperatures from Landsat thermal infrared retrievals and synchronous weather observations in Shenzhen, China // Remote Sens. Appl. Soc. Environ. 2017. V. 7. P. 40–48. DOI: 10.1016/j.rsase.2017.06.002

# \_\_\_\_\_ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ \_\_ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДНОГО ПИТАНИЯ ОЗ. БОЛЬШОЕ ТУРАЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

© 2021 г. С. И. Шапоренко<sup>а, \*</sup>, С. Л. Десинов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия \*E-mail: ser-shaporenko@yandex.ru Поступила в редакцию 01.09.2020 г.

Впервые за счет анализа наборов космических снимков за период с 2003 г. исследованы процессы поступления водного притока естественным путем в оз. Большое Турали, которое образовалось из периодически пересыхающей лагуны Каспийского моря при падении его уровня. Установлено, что обводнение происходит за счет выклинивания грунтовых вод и затока ливневых сточных вод с южной окраины г. Каспийска. В зависимости от интенсивности атмосферных осадков выделены 3–4 основных типа питания. Показано, что современные ресурсы коллекторно-дренажных вод недостаточны для устойчивого водного снабжения озера, они продолжают сокращаться в условиях роста испаряемости и снижения баланса увлажнения.

*Ключевые слова*: лагуна, озеро, водосбор, пересыхающий водоем, обводнение, рыбоводство, коллектор дренажных вод, испаряемость, баланс увлажнения

DOI: 10.31857/S0205961421020081

# введение

Озеро Большое Турали находится около южной окраины Каспийска на севере Карабудахкентского района Дагестана. К западу от него на расстоянии 250 м на юге и 670 м на севере и на 0.4 м гипсометрически выше расположено оз. Малое Турали. При максимальном наполнении площади озер в настоящее время составляют соответственно 4.8 и 1.4 км<sup>2</sup> (по данным Росреестра), по этому параметру они считаются крупнейшими в Приморском Дагестане. Располагаются они на двух древних морских террасах, сформированных в периоды позднехвалынской и в последнюю фазу новокаспийских трансгрессий. Образовались озера из отшнуровавшихся лагун Каспийского моря при падении его уровня, унаследовав их плоские выровненные чаши. Максимальные глубины в 1-1.2 м отмечаются в центральных плесах. Между Туралинскими озерами протягивается гряда, сложенная плотными песчаными отложениями, ракушей, суглинками и известняками, которая служит препятствием для поверхностного водообмена между озерами.

Геоморфологическое положение озер кратко описывалось при изучениях региона сотрудниками Дагестанского университета и расположенной рядом базы МГУ, в отчете по результатам инженерно-геологических изысканий (Эльдаров, 1972; Куклин, Лаптева, 1982; Рычагов, 1997; Свиточ, Янина, 2003). Однако вопросы водного питания озер ими практически не затрагивались или рассматривались, когда водоемы существовали на стадиях морских лагун (Касимов и др., 2006). Не касались их и работы биологов из ДГУ (Ахмедова, Расулова, 2009; Абдурахманов и др., 2011). Имеются указания, что грунтовые воды и атмосферные осадки – источники питания озер Большое и Малое Турали в их естественном состоянии (Эльдаров, 1972; Водные ресурсы..., 1996). Однако сведений о зарегистрированных источниках и количестве поступления подземных вод в водоемы найти не удалось. Их роль в обводнении озера оставалась неясной. О наличии родников вблизи и на дне озер никто не сообщал. Между тем в отдельные периоды времени на географических картах начала XX в. был нанесен родник недалеко от юго-восточного берега оз. Большое Турали (рис. 1, а и б), а также приток в оз. Малое Турали с юга из небольшого безымянного озера, питавшегося, возможно, подземными водами (рис. 1, в). На более ранней карте Стрельбицкого указанные объекты отсутствуют, их нет и на более поздних.

Выявление природных механизмов формирования водного питания Туралинских озер является важнейшим условием разработки планов их сохранения в связи с наблюдающимся усилением дефицита водных ресурсов и постепенным обезвоживанием озер. На протяжении последних лет водное зеркало оз. Малое Турали не превышает 50% от максимальных размеров, а оз. Большое Турали, даже при искусственном обводнении в холодное время года, летом пересыхает. Современные проблемы озер в основном связывают со



**Рис. 1.** Фрагменты карт на территорию Туралинских озер: *a* – Kavkaz M 1 : 210000 1901–1916 гг.; *б* – Специальной карты Европейской части СССР Управления военных топографов (Махач-Кала) М 1 : 420000 1933 г.; *в* – Генерального штаба Красной армии М 1 : 200000 1943–1944 гг.

строительством инфраструктуры и сельскохозяйственным освоением водосбора, с жилой и дачной застройкой окружающих пространств. При современном низком стоянии уровня Каспийского моря подпитка из него подземными водами исключена. Как показали собственные обследования, площади поверхностных водосборов резко сократились: оз. Малое Турали с 45.8 до 7.2, а оз. Большое Турали с 19.8 до 10.5 км<sup>2</sup> вместе с площадью самих озер (расчеты С.Т. Кудяковой). Сооружение в 1987 г. магистрального коллектора дренажных вод К-6, проходящего рядом, могло полностью отрезать озера от потока грунтовых вод, распространяющихся от предгорий к Каспийскому морю.

Тем не менее, при отсутствии искусственных попусков воды, регулярно в оз. Большое Турали можно наблюдать отдельные разновеликие по площадям лужи в центральном понижении дна или небольшой слой воды, который может сохраняться в течение 1-2 мес. в холодное время года. когда дефицит водного баланса близок к нулю. Ясность, за счет чего и каким образом поступает, отсутствовала. Работы, в которых исследуются эти процессы, авторам не известны. Только при накоплении существенного объема результатов дистанционного зондирования из космоса такая возможность появляется. При выполнении данной работы была сделана попытка предложить и попытаться обосновать механизм заполнения чаши озера водой естественным путем, а также рассмотреть возможность его искусственного обводнения за счет проходящего рядом коллектора дренажных вод.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В качестве основных использованы космические снимки с аппарата Сентинел-2. В качестве вспомогательного материала для уточнений привлекались снимки с МКС и аппарата Ландсат-8. Всего просмотрено 265 снимков за период с 2003 по 2020 гг. Вода в озере с разных космических аппаратов идентифицируется разными цветами, в окраске большую роль играют накопившиеся в донных отложениях озер соли. За счет гигроскопичности даже при небольшом увлажнении донных отложений цвет их меняется от бирюзового до ярко зеленого. Сходные цвета имеют донные отложения в заливе Кара-Богаз Гол Каспийского моря, в Соленом озере на границе США и Канады. В видимом спектре вода в озерах в оттенках желто-бежевых цветов, близка к цвету песчаных донных отложений.

Выбранные космические снимки с аппарата Сентинел-2 сопоставлены с данными по атмосферным осадкам на МС Махачкала. Следует отметить, что Туралинские озера удалены от метеостанции на расстояние 33 км, поэтому в отдельных случаях данные по осадкам могут расходиться с фактическими величинами. Особенно заметно это в летнее время, когда осадки выпадают из грозовых облаков, которые могут проходить узкой полосой.

Данные по метеорологическим параметрам предоставлены МС Махачкала. Расчет испаряемости по формуле (Иванов, 1954).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Можно выделить три-четыре варианта развития процессов увлажнения и поступления воды в озеро.

В качестве первого варианта рассмотрим ситуацию с увлажнением озера в сентябре 2019 г. Чаша озера полностью высохла к середине июня и с 16 числа этого месяца оставалась сухой до 7 сентября, когда выпало 15 мм дождевых осадков (рис. 2). Через пять дней на снимке от 11 сентября видно вытянутое более темное пятно увлажненного грунта дна озера в центральном понижении. В середине пятна можно различить узкую наиболее темную борозду, заполненную водой. Пятно несколько уменьшилось и потускнело к 16 сентября, а 24 сентября стало почти незаметным. К началу октября дно озера полностью высохло, однако на снимке оно более серого цвета за счет сохраняющейся повышенной влажности грунтов и гигроскопичности солей. Повышенную влажность поддерживали осадки, выпадавшие в небольших количествах 22, 27 и 28 сентября. Представляется, что снимки отражают следующую цепочку процессов. Дождь 7 сентября увлажнил всю чашу озера и его водосбор. Выпавшие осадки сразу впитались песчаными грунтами, не образовывая поверхностного стока. Вода опустилась до первого водоупорного слоя (сульфидные глинистые отложения лечебных грязей) и постепенно по уклону их поверхности стекла к середине чаши озера. Здесь, постепенно накапливаясь, вода осадков стала выклиниваться на дневную поверхность и образовывать лужи. Таким образом, можно представить процесс начальной стадии заполнения чаши озера атмосферными осадками, выпадающими разово в умеренных количествах.

Аналогичным образом происходил заток грунтовых вод в сухую озерную чашу в конце 2015 г., причем процесс повторился два раза (рис. 3). В холодное время года просачивание грунтовых вод происходит при меньших объемах выпавших осадков, синхронность с данными по осадкам в данном случае хуже по сравнению с предыдущим примером, что связано с удаленностью метеостанции от водосбора озера.

Второй вариант водного питания, когда процесс сначала развивается, как и в первом случае, но благодаря повышенному количеству осадков происходит заток поверхностных вод с северной части водосбора (рис. 4). На втором фрагменте рисунка (8 ноября 2019 г.) увлажнение дна озера только началось скоплением грунтовых вод, а 20 ноября происходит заток поверхностных вод с северного участка водосбора, где раньше был обособленный плес озера. Поступающие поверхностные воды выработали промоину в северной части дна озера, которую можно видеть на многих других снимках в предыдущие годы. В декабре

#### ШАПОРЕНКО, ДЕСИНОВ



Рис. 2. Влияние выпадения атмосферных осадков на обводненность оз. Большое Турали в теплое время года. Космические снимки Сентинел-2. Данные по осадкам предоставлены МС Махачкала.



Рис. 3. Влияние выпадения атмосферных осадков на обводненность оз. Большое Турали в холодное время года. Космические снимки Сентинел-2.

происходит скопление воды в центральном пониженном участке дна, что отображается на снимке более насыщенным зеленым цветом. На дне южного плеса озера в декабре появилось пятно переувлажненного грунта за счет выклинивания грунтовых вод. Такая ситуация сохранялась и в январе 2020 г., когда было проведено обследование с отбором проб воды. Следует отметить, что с северной стороны озера в настоящее время на водосборе существует два понижения, на которых скапливаются дождевые воды. Это остатки северного обособленного плеса озера. На рис. 4 на фрагменте от 20 декабря они помечены двумя окружностями. В отличие от западного, восточное пони-



**Рис. 4.** Влияние выпадения атмосферных осадков на обводненность оз. Большое Турали в холодное время года. Вариант с поверхностным притоком. Космические снимки Сентинел-2.

жение стока в озеро не имеет. Если интенсивность застройки местности сохранится, то в скором времени эти участки могут быть засыпаны и перестанут выделяться в рельефе.

Третий вариант, когда экстремальные осадки приводят к быстрому увлажнению большей части дна озера через приток с севера, видимость выклинивания грунтовых вод не успевает проявиться (рис. 5). Процесс, начав развиваться в середине октября 2016 г., продолжался до конца года, хотя в декабре осадков стало выпадать гораздо меньше. Вода в озере сохранялась вплоть до начала апреля следующего года, потом водоем стал заметно высыхать. В мае свободной воды на поверхности дна почти не осталось, но поверхность грунтов продолжала оставаться переувлажненной.

Описанные варианты касаются естественного увлажнения чаши водоема. Периодически они сочетались с попытками искусственного наполнения оз. Большое Турали, которые осуществлялись в холодные сезоны 2017 и 2018 гг., были и более ранние мероприятия по обводнению лимана. Благодаря искусственному обводнению и периодическому выпадению атмосферных осадков вода может держаться в чаше до апреля—мая. Например, при выпадении осадков примерно 10—20 мм в день в 2018 г.

Заток с северной части водосбора в отдельных случаях может быть главным фактором увлажне-

ния, что наблюдалось в феврале и марте 2020 г. (рис. 6). При этом количество атмосферных осадков по м/с Махачкала было относительно невелико: в феврале выпало 10.9 мм (8 и 9 числа), а в марте только 3.2 мм. Это гораздо ниже нормы для этих месяцев за 2000—2019 гг., которая составляет соответственно 29.9 и 21.7 мм. В результате увлажняющий поток не доходил до южной части озера, поступившая вода в основном концентрировалась в центральной, наиболее пониженной части дна.

При анализе возможных схем увлажнения чаши оз. Большое Турали необходимо учитывать, что заток с северной части водосбора определяет не только природный фактор – атмосферные осадки, но определенную роль играет и значительное антропогенное влияние. Оно проявляется не столько в увеличении коэффициента стока с территории застройки, сколько в поступлении вместе с поверхностными ливневыми стоками загрязняющих веществ. Визуально наиболее четко такие события проявились 10 и 20 августа 2018 г., хотя процесс начался раньше, а его последствия видны и на сентябрьских снимках, и на майском снимке 2019 г. Цвет воды в озере менялся под воздействием загрязнений и ранее, например в июле 2012 г. (рис. 7).

В подборе космических снимков (рис. 7) прослеживается поступление в озеро поверхностных вод с юго-западного берега через канал, соединя-

## ШАПОРЕНКО, ДЕСИНОВ



Рис. 5. Влияние выпадения атмосферных осадков на обводненность оз. Большое Турали при интенсивных осадках. Вариант с интенсивным поверхностным притоком. Космические снимки Сентинел-2.



Рис. 6. Динамика обводненности оз. Большое Турали в период обследования в холодное время года. Космические снимки Сентинел-2.



**Рис.** 7. Поступление и распространение загрязнений в озере. Космические снимки Сентинел-2, снимок от 14 июля 2012 г. с МКС.



**Рис. 8.** Многолетняя изменчивость испаряемости (I) и баланса увлажнения (2) в мм, в сопоставлении со средними годовыми расходами воды в коллекторе K-6, м<sup>3</sup>/с.

ющий озеро с коллектором. Заполнение оз. Большое Турали коллекторной водой проводили неоднократно, в основном в холодный сезон. Источниками воды служили сначала канал КОР (в середине XX в.), затем коллектор дренажных вод К-6. Этот сезон наиболее благоприятен с точки зрения повышенного расхода воды в коллекторе, имеющего сезонное колебание, и с точки зрения подготовки водоема для весеннего зарыбления. Периодически продолжавшееся до середины 2010-х гг. искусственное заполнение лагуны водой не достигало требуемых для рыбохозяйственной деятельности объемов. Сейчас вода в озеро не подается, в результате чего гидроэкологическое состояние приблизилось к естественному.

Сведения по расходам воды в коллекторе, предоставленные из Карабудахкентского филиала ФГБУ "Минмелиоводхоз РД", показывают многолетнее сокращение в нем воды (рис. 8). За период наблюдений с 2006 по 2017 гг. сток воды сократился в 2.3 раза. Собственное измерение расхода в октябре 2019 г. дало значение в 63 л/с. Если в начале 2000-х гг. получалось заполнить водоем на 80–90%, то в 2017–2018 гг. этого показателя достичь уже не удавалось. Если принять расход воды в октябре за величину среднего годового, что близко к таковому согласно режимным наблюдениям, то в настоящее время годовой ресурс коллекторных вод составит 1988 тыс. м<sup>3</sup>/год. При площади водоема 4816 тыс. м<sup>2</sup>, уровень воды в нем можно поднять на 40 см, если использовать весь объем воды. Такой уровень совершенно недостаточен, чтобы вести рыбоводство, которое требует создание проточности. К тому же по опыту предыдущих лет, может выделяться только часть годового стока коллекторных вод на эти нужды.

Негативную ситуацию с водным питанием усугубили хозяйственные преобразования на водосборе, почти в два раза уменьшившие водосборную площадь, дачно-жилищная застройка побережья, которая вплотную подошла к береговой линии при отсутствии соблюдения природоохранных ограничений. Существенное значение имеет аридизация регионального климата, выражающаяся в увеличении испаряемости и снижении баланса увлажнения в последнее десятилетие (графики 1 и 2 на рис. 8).

При обследовании озера осенью 2019 г., канал и шлюз, через который вода должна была подаваться в озеро, были в нерабочем состоянии. Но даже при таком состоянии гидротехнических сооружений в канале может собираться дождевая вода и стекать в чашу озера. Лето 2018 г. было относительно влажное: в июле выпало 39 мм осадков, 3–4 августа – 0.9 мм, а с 9 по 12 августа – 25.3 мм и 19 августа — еще 1.8 мм. На снимках от 10 и 27 августа видно, что этот заток воды не соединен с затоком с северной стороны. Кроме этого, вода из разных источников различается по цвету.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование механизма обводнения оз. Большое Турали естественным путем показало, что таким образом может накопиться слой воды в центральном понижении максимальной толщиной не более 10 см. Для создания водной толщи в оз. Большое Турали хотя бы в один метр необходим дополнительный источник воды. Этот источник лолжен быть лостаточно обильным. так как для экологически устойчивого существования озера необходимо оградить его от поступления грязных сточных вод со стороны застройки южного пригорода г. Каспийска. Обводнение озера за счет стока проходящего рядом коллектора К-6 явно недостаточно, о чем свидетельствуют примерные подсчеты водного баланса и неоднократные осуществлявшиеся попытки заполнения чании волоема.

На первых этапах своего развития ДЗЗ в основном служило инструментом обеспечения картографии и связанных с ней направлений хозяйственной деятельности гидрографической информацией. С накоплением архивной базы и обеспечения ее легкодоступности появилась возможность перейти к исследованиям гидрологических процессов и их отдельных режимных характеристик, которые испытывают резкие колебания, сложно выявляемые одними наземными методами.

Современные космические съемки для потребителя имеют преимущества в кратности и регулярности получения информации (от 1 до 5–6 раз в месяц), в охвате одним снимком всей изучаемой области, возможности увидеть на снимке те районы, куда при полевых исследованиях отсутствует доступ. Снимки дают возможность оценить динамику изменений как в целом на изучаемом объекте, так и в разных его частях, что чрезвычайно важно в установлении параметров пересыхающих водоемов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за помощь сотрудникам ИГ РАН А.Н. Хропову и С.Т. Кудяковой.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по госзаданиям № 0148-2019-0007 и № А19-119022190168-8 с финансовым обеспечением исследований со стороны ООО "Большая Турали".

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абдурахманов Г.М., Ахмедова Г.А., Расулова М.М. Оценка современного экологического состояния и трофического статуса водоемов Приморской низменности Дагестана. Махачкала: ДГПУ, 2011. 98 с.

Ахмедова Г.А., Расулова М.М. Состояние малых озер в урбанизированных ландшафтах и их защита в условиях антропогенной нагрузки (на примере озер Ак-гель и Большое Турали) // Юг России: экология, развитие. 2009. № 4. С. 157–161.

Водные ресурсы Дагестана: состояние и проблемы / Отв. ред. И.М. Сайпулаев, Э.М. Эльдаров. Махачкала, 1996. 180 с.

Иванов Н.Н. Об определении величин испаряемости // Изв. Всес. геогр. общ. 1954. Т. 86. № 2. С. 189–196.

Касимов Н.С., Геннадиев А.Н., Лычагин М.Ю. Экологогеохимические проблемы Прикаспия // Изменения природно-террит. компл. в зонах антропог. воздействия / Отв. ред. акад. В.М. Котляков. М.: Медиа-Пресс, 2006. 280 с.

*Куклин Д.Н., Лаптева Л.А.* Отчет о детальных грязеразведочных работах на озерах Большое и Малое Турали Дагестанской АССР. Специализированное КГГП гидрогеологического управления "Геоминвод". М., 1982. 135 с. (рук.)

*Рычагов Г.И.* Плейстоценовая история Каспийского моря. М.: изд-во Моск. ун-та, 1997. 267 с.

*Свиточ А.А., Янина Т.А.* Малакофауна опорного разреза каспийского голоцена Турали (Дагестан) // Докл. РАН. 2003. Т. 389. № 4. С. 513–518.

Эльдаров М.М. Геоморфология Низменного Дагестана // Физическая география Низменного Дагестана. Тр. естественно-географического факультета. Вып. VII. Махачкала: Дагучпедгиз, 1972. С. 14–41.

# Research of Water Supply of Lake Bolshoye Turali Using Space Images

## S. I. Shaporenko<sup>1</sup> and S. L. Desinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Russian Federation Institute of Geography Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Lake Bolshoye Turali was formed from a periodically drying detached lagoon of the Caspian Sea as a result of a drop in its water level and exists in conditions of a high moisture deficit. Attempts have begun to organize a fishery in it from the middle of the twentieth century, and its water supply is mainly due to artificial watering, using the water resources of a collector passing nearby. The ongoing activities do not give positive results. For the first time, due to the analysis of sets of satellite images for the period since 2003, the processes of water

#### ШАПОРЕНКО, ДЕСИНОВ

inflow in a natural way have been studied. Watering occurs due to the leakage out of groundwater and the influent of storm sewage from the southern outskirts of Kaspiysk town. Three–four main types of water food are identified, depending on the intensity of precipitation. Modern resources of collector-drainage waters are insufficient for sustainable water supply to the lake, they continue to decline in conditions of increasing evaporation and decreasing moisture balance.

*Keywords*: Lagoon, lake, dry out reservoir, watering, fish farming, drainage water collector, vaporability, moisture balance

### REFERENCES

Abdurakhmanov G.M., Akhmedova G.A., Rasulova M.M. Otsenka sovremennogo ekologicheskogo sostoyaniya i troficheskogo statusa vodoemov Primorskoy nizmennosti Dagestana [Assessment of the current ecological state and trophic status of water bodies in the Primorskaya lowland of Dagestan]. Makhachkala: Dagestanskiy gosudarstvennyy pedagogicheskiy universitet, 2011. 98 p. (In Russian).

Akhmedova G.A., Rasulova M.M. Sostoyanie malykh ozer v urbanizirovannykh landshaftakh i ikh zashchita v usloviyakh antropogennoy nagruzki (na primere ozer Ak-gel' i Bol'shoe Turali) [The state of small lakes in urbanized landscapes and their protection under anthropogenic pressure (for example, lakes Ak-gel and Bolshoye Turali)] // Yug Rossii: ekologiya, razvitie. 2009. № 4. P. 157–161 (In Russian).

*Ivanov N.N.* Ob opredelenii velichin isparyaemosti [On the determination of the values of evaporation] // Izv. Vses. geogr. obshch. 1954. V. 86.  $\mathbb{N}$  2. P. 189–196 (In Russian).

*Jel'darov M.M.* Geomorfologija Nizmennogo Dagestana [Geomorphology of Low Dagestan] // Fizicheskaja geografija Nizmennogo Dagestana [Physical Geography of Low Dagestan]. Tr. estestvenno-geograficheskogo fakul'teta. Vyp. VII. Mahachkala: Daguchpedgiz, 1972. P. 14–41 (In Russian). *Kasimov N.S., Gennadiev A.N., Lychagin M.Ju.* Jekologogeohimicheskie problemy Prikaspija [Ecological and geochemical problems of the Caspian region] // Izmenenija prirodno-territ. kompl. v zonah antropog. vozdejstvija [Changes in natural-territe. set in the zones of anthropog. impact] / Otv. red. akad. V.M. Kotljakov. Moscow: Media-Press, 2006. 280 p. (In Russian).

*Kuklin D.N., Lapteva L.A.* Otchet o detal'nyh grjazerazvedochnyh rabotah na ozerah Bol'shoe i Maloe Turali Dagestanskoj ASSR [Report on detailed mud exploration work on lakes Bolshoye and Maloye Turali of the Dagestan ASSR] Specializirovannoe KGGP gidrogeologicheskogo upravlenija "Geominvod". Moscow, 1982. 135 p. (hands) (In Russian).

*Rychagov G.I.* Plejstocenovaja istorija Kaspijskogo morja [Pleistocene history of the Caspian Sea] Moscow: Moscow University Publishing House, 1997. 267 p. (In Russian).

Svitoch A.A., Janina T.A. Malakofauna opornogo razreza kaspijskogo golocena Turali (Dagestan) [Malakofauna of the reference section of the Caspian Holocene Turali (Dagestan)] // Doklady RAN. 2003. V. 389. № 4. P. 513–518 (In Russian).

Vodnye resursy Dagestana: sostoyanie i problem [Water resources of Dagestan: state and problems] / Otv. red. I.M. Saypulaev, E.M. El'darov. Makhachkala, 1996. 180 p. (In Russian).

# КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

# СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ СУБАКВАЛЬНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЗЕЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

© 2021 г. Н. М. Легачева<sup>*a*, \*</sup>, А. А. Шехирев<sup>*a*</sup>

<sup>а</sup>Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия \*E-mail: legacheva2015@mail.ru Поступила в редакцию 10.09.2020 г.

Проведен геоинформационный анализ изменения береговой линии и площади субаквальных ландшафтов Зейского водохранилища с 1999 по 2016 гг. Проанализирован процесс зарастания субаквальных ландшафтов участков впадения в водохранилище рек бассейна Зеи. Использованы методы дистанционного зондирования Земли, применена обработка космических снимков с использованием индексов MNDWI и NDVI, составлен комплекс карт территории в программе ArcGIS, описано рациональное использование субаквальных ландшафтов Зейского водохранилища. При анализе составленных карт на выбранных участках выявлено, что на периодически затопляемой территории зафиксирована разреженная растительность и низкая продуктивность фотосинтетически активной биомассы на пойменных почвах вследствие отложения осадков после катастрофического наводнения 2013 г.

*Ключевые слова*: Зейское водохранилище, субаквальные ландшафты, космические снимки, водный индекс MNDWI, вегетационный индекс NDVI

10.31857/S0205961421020044

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время большое распространение для исследования зон прибрежных (субаквальных) территорий получил спутниковый мониторинг (Кузмина и др., 2006; Бондур, 2010). Субаквальный ландшафт представляет собой прибрежную территорию вдоль береговой линии в пойме реки, озера или водохранилища, развивающуюся в условиях периодического затопления пресными водами. Спутниковый мониторинг широко используется для изучения гидрологических объектов и наводнений с ними связанных. Одним из основных инструментов дистанционного зондирования Земли в определении последствий наводнений является расчет водного и вегетационного индекса (Погорелов и др., 2017).

Зейское водохранилище – крупнейший искусственный водоем на Дальнем Востоке России (Амурская область) – расположено в верхнем течении р. Зеи. Водохранилище имеет комплексное значение. Во-первых, служит для гидроэнергетических целей, во-вторых, контролирует противопаводковую ситуацию. Одной из главных его функций является нивелирование пиков подъема уровня воды, вызванных муссонными дождями с целью ликвидации угроз наводнения. Годовое количество осадков в месте нахождения водохранилища достигает более 1000 мм. Для данного региона характерен летний максимум осадков в объеме 70% от годовой нормы. Водный режим водохранилища и его регулирование существенно влияет на использование прибрежных территорий в агропромышленном комплексе. В начале XXI века катастрофические наводнения в Амурской области зафиксированы в 2007 и 2013 гг. (Курганова и др., 2014). Так, в 2007 г. было затоплено более 100 населенных пунктов, а также дороги, линии связи, сельскохозяйственные угодья. При повышении уровня воды до отметок средней поймы затапливалось около 70—80% лугов и пастбищ (Цой, 2012).

В силу значительной протяженности береговой линии Зейского водохранилища осуществлять наземный мониторинг трансформации прилегающих к нему прибрежных территорий чрезвычайно трудоемко (Воротникова и др., 2016). Это задача с большим объемом геодезических измерений, что трудновыполнимо и малоэффективно. Традиционные подходы, основанные на наземном сборе данных, не позволяют достаточно оперативно решать задачи экологического мониторинга, инвентаризации и картографирования перспективных сельскохозяйственных угодий. Вследствие чего метод дистанционного зондирования представляется наиболее оптимальным для мониторинга пространственно-вре-

№ п/п	Спутник	Каналы		Разрешение м	Пата
		MNDWI	NDVI	тазрешение, м	Дата
1	Landsat-7	2и7	3-4	30	06.08.1999
2	Landsat-8	3и6	4-5	30	20.08.2013
3	Landsat-8	3и6	4-5	30	28.08.2016

Таблица 1. Сведения об использованных спутниковых снимков

менных изменений затопляемых территорий. Использование спутниковых данных позволяет существенно упростить сбор и обработку данных (Фролов, 2020). Для обработки больших потоков спутниковых данных применяют специальные методы (Бондур, 2014; Бондур, Старченков, 2001).

Для максимально эффективного использования затопляемых субаквальных ландшафтов Зейского водохранилища в разных отраслях сельского хозяйства Амурской области необходимо проанализировать изменения площади участков и показателя растительной продуктивности на них посредством спутникового мониторинга. Отметим, что при данном мониторинге затопляемых территорий водохранилища, находящегося в муссонном климате, важно использовать качественные космические снимки определенного времени года.

Цель настоящей работы — определить изменения площади затопления Зейского водохранилища по данным спутникового мониторинга до и после катастрофического наводнения 2013 г., а



**Рис. 1.** Космический снимок Зейского водохранилища с Landsat-8: данные от 20.08.2013.

также оценить интенсивность зарастания прибрежных субаквальных ландшафтов. В задачи исследования входят обработка спутниковых снимков территории, расчет водного индекса, а также анализ многолетних изменений площади водохранилища, процесса зарастания и заиления субаквальных ландшафтов по данным вегетационного индекса.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследовании рассмотрены затопляемые субаквальные ландшафты водохранилища и плесов рек Зеи и Уркана. Реки, впадающие в водохранилище, отличаются наличием постоянного стока, высокими скоростями течения, тесной связью с наземными экосистемами и исключительным разнообразием биотопов на сравнительно небольшом пространстве. В связи с широким распространением многолетней мерзлоты для всей территории исследования характерно значительное распространение поверхностной заболоченности (Корниенко, 2011). Основную опасность для региона представляют наводнения, увеличивающие площади субаквальных ландшафтов в регионе.

Измерение площади затопления прибрежных субаквальных ландшафтов Зейского водохранилища по данным дистанционного зондирования проводилось с использованием разновременных многоспектральных спутниковых снимков Landsat за 1999—2016 гг. Сведения о использованных снимках Landsat приведены в табл. 1. В исследовании использованы космические снимки с облачностью не более 30% (рис. 1). Создание картографического материала и его анализ проводились с помощью программного комплекса ArcGIS. Обработка снимков выполнена в программе ArcMap.

Автоматизированное распознавание и классификация продуктивности проведены на основе нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI; классификация объектов "вода– не вода" с использованием модифицированного нормализованного разностного водного индекса MNDWI. Индекс MNDWI рассчитан по данным спектральных каналов 3 и 6 снимков с Landsat-8. Расчет NDVI произведен по данным 4 и 5 спектральных каналов Landsat-8.

## СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ

Таблица 2. Индексы и формулы для их расчета

Индекс	Формула расчета
Модифицированный нормализованный разностный	MNDWI = (GREEN – SWIR2)/(GREEN + SWIR2)
Нормализованный разностный	NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)

Примечание. GREEN – зеленый канал (0.525–0.600 мкм); SWIR2 ближний инфракрасный канал (1.56–1.66 мкм); RED – красный канал (0.64–0.72 мкм); NIR – инфракрасный канал (0.77–0.88 мкм)

Таблица 3. Сводная таблица результатов классификации по вегетационному индексу на основе Landsat-8

Класс	Объект	NDVI
1	Водные объекты	-1-0
2	Растительность скудная (песок, камни)	0-0.2
3	Растительность разреженная (кустарники)	0.2-0.3
4	Растительность низкой продуктивности (пастбища)	0.3-0.4
5	Растительность высокой продуктивности (лес)	0.4-1

Индекс MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) распознает разнообразные водные поверхности. Водный индекс эффективно использовать для классификации на снимках поверхности "вода—не вода", кроме этого индекс эффективно подавляет и/или удаляет шумовые эффекты с поверхности суши. Данный индекс необходим для обнаружения поверхностных вод среди заболоченной местности и определения степени покрытия участка поверхностными водами. Индекс использовался в исследовании на раннем этапе для более точного дешифрирования местности. Посредством использования индекса MNDWI выделен контур самого водохранилища и речная сеть, питающая его.

Индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) является распространенным количественным показателем фотосинтетически активной биомассы и отражает степень заиления и зарастания растительностью затопляемого участка (Бондур, Воробьев, 2015). NDVI прост в вычислении, имеет широкий динамический диапазон, умеренно чувствителен к изменениям атмосферного и почвенного фонов при дистанционной оценке зеленой фитомассы (Бондур, Воробьев, 2015; Гопп и др., 2019). Формулы расчета водного и вегетативного индекса приведены в табл. 2.

NDVI достоверно распознает растительные, почвенные и водные объекты (Ichii et al., 1990). Для определения степени зарастания применена классификация в пять классов в интервале значений от -1 до +1, где значение от 0 до -1 – открытые водные поверхности (табл. 3).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из анализа данных по площадям затопления субаквальных ландшафтов Зейского водохрани-

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 2 2021

лища, приведенных на рис. 2–4, которые получены за 1999, 2013, 2016 гг., видно, что минимальная площадь затопления и, следовательно, максимальная площадь субаквальных ландшафтов наблюдалась в 1999 г. (2110 км<sup>2</sup>), а в августе 2013 г. во время катастрофического наводнения площадь затопления была максимальна (2506.3 км<sup>2</sup>). После 2013 г. наблюдается снижение уровня водной поверхности, обнажение субаквальных ландшафтов на 33 км<sup>2</sup> и повышение уровня продуктивности биомассы на исследуемой территории. Максимальных значений площади прибрежных субаквальных ландшафтов в 2016 г. по сравнению к 2013 г. достигли на востоке водохранилища на участках плесов р. Зея (рис. 2, *a*) и р. Уркан (рис. 2, *б*).

На рис. 2 видно, что площадь зеркала водохранилища при нормальном подпорном уровне в 2013 г. увеличилась по сравнению с 1999 г. максимально, а субаквальные ландшафты полностью затоплены. Также наблюдается подъем уровня воды во впадающих в водохранилище реках, что связано с интенсивными муссонными осадками, вызвавшими катастрофическое наводнение 2013 г.

С помощью водного индекса MNDWI выделены контуры водохранилища в период минимального нормального подпорного уровня воды в августе 1999 г., которые в дальнейшем использовались для нахождения площади субаквальных ландшафтов наложением контура береговой линии водохранилища 1999 г. на снимок с береговой линией 2013 г. (рис. 3). Таким образом, были получены данные о максимальной площади субаквальных периодически затопляемых ландшафтах береговой линии Зейского водохранилища, которые составили 396.3 км<sup>2</sup>. К 2016 г. уровень зеркала водохранилища снизился, обнажив 33 км<sup>2</sup> затопленных территорий. Для изучения степени зарас-



**Рис. 2.** Изменение площади прибрежных территорий субаквальных ландшафтов Зейского водохранилища с 1999 по 2016 гг. по результатам дешифрирования космических снимков Landsat с использованием MNDWI.



**Рис. 3.** Ключевой участок Зейского водохранилища с рассчитанным водным индексом MNDWI на даты съемки: a - 6 августа 1999 г.; b - 20 августа 2013 г.; e - 28 августа 2016 г.

тания ключевых участков был применен вегетационный индекс NDVI (рис. 4).

На рис. 4 представлены карты распределения фотосинтетической активности биомассы терри-

тории исследуемого ключевого участка Зейского водохранилища за 1999–2016 гг. На карте, построенной по данным 2013 г., виден существенный разлив Зейского водохранилища. По сравне-



**Рис. 4.** Распределение фотосинтетически активной биомассы Зейского водохранилища по данным нормализованного разностного индекса растительности NDVI на даты съемки: *a* – 6 августа 1999 г.; *б* – 20 августа 2013 г.; *в* – 28 августа 2016 г.

нию с 1999 г., заметен более высокий вегетационный индекс NDVI на субаквальных ландшафтах поймы р. Зея, что может свидетельствовать о приросте фотосинтетически активной биомассы на данной территории. Показатель вегетационного индекса NDVI изменялся от 0 до 0.4, выявляя ареалы со скудной, разреженной, низкопродуктивной и высокопродуктивной растительностью.

Уменьшение площади затопления Зейского водохранилища с 2506.3 км<sup>2</sup> в 2013 г. до 2473.3 км<sup>2</sup> в 2016 г. привело к постепенному зарастанию субаквальных ландшафтов, что хорошо отражает показатель вегетационного индекса NDVI за 2016 г. (рис. 4, *в*). На затопленных в 2013 г. территориях к 2016 г. наблюдалось увеличение биомассы, а следовательно, и пространственная дифференциация вегетационного индекса NDVI. Это свидетельствует о наличии на субаквальных ландшафтах растительности с различной степенью продуктивности, которая в короткий срок набрала значительную биомассу, необходимую для использования земель, например, под пастбища.

Площадь зеркала водохранилища при нормальном подпорном уровне в 2016 г. являлась средним показателем между 1999 и 2013 гг. После крупнейшего наводнения 2013 г. площадь зеркала водохранилища уменьшилась, а площадь субаквальных ландшафтов соответственно увеличилась 33 км<sup>2</sup>, что составляет порядка 8.3% от прибрежных периодически затопляемых ландшафтов Зейского водохранилища в 1999 г.

# выводы

1. Применение данных дистанционного зондирования Земли для решения задач мониторинга перспективное направление, преимуществами которого являются оперативность и достоверность получаемой информации, ее объективность и независимость в оценке состояния и изменений исследуемых прибрежных субаквальных ландшафтов. Спутниковый мониторинг имеет практическую и экономическую целесообразность при условии использования автоматизированных методов дешифрирования, базирующихся на спектральноинформационных свойствах в зависимости от качественно-количественных показателей земного покрова и их сезонной изменчивости.

2. На основе массива спутниковых данных с высоким пространственно-временным разрешением исследована растительная продуктивность субаквальных ландшафтов Зейского водохранилища. По распределению водного индекса выделены контуры береговой линии водохранилища за 1999, 2013 и 2016 гг. На основе анализа распределения вегетативного индекса в пределах ключевого участка определена степень фотосинтетически активной биомассы субаквальных ландшафтов.

3. Показано влияние муссонных дождей и катастрофических наводнений на существенную пространственно-временную динамику фотосинтетически активной биомассы и, как следствие, возможность использования затопляемых территорий. Такие земли, как правило, не используются, но при кратковременном затоплении на них образуются плодородные почвы, вследствие отложения осадка, богатого органическим веществом. Такие территории можно использовать в дальнейшем для выращивания сельскохозяйственных культур или пастбищ для уменьшения сельскохозяйственной нагрузки на другие территории (Кальная, 2014).

4. Эксплуатация водохранилища приводит к значительной трансформации окружающей природной среды, возникновению различных геоэкологических ситуаций, требующих помимо природоохранных мероприятий всестороннего изучения и мониторинга.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.

https://doi.org/10.7868/S0205961414010035

Бондур В.Г., Воробьев В.Е. Космический мониторинг импактных районов Арктики // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 4–24.

https://doi.org/10.7868/S0205961415040028

Бондур В.Г., Старченков С.А. Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.

Воротникова Н.В., Зубенкова М.А. Геоинформационное картографирование антропогенной нарушенности природной среды промышленными и техногенными процессами на примере Зейского водохранилища Амурской области // Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра: материалы II Международной научной конференции (г. Москва, июнь 2016 г.). Москва: Буки-Веди, 2016. С. 10–12. Гопп Н.В., Савенков О.А., Нечаева Т.В., Смирнова Н.В., Смирнов А.В. Использование NDVI в цифровом картографировании содержания фосфора в почвах и оценка обеспеченности им растений // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 2. С. 65–73.

Кальная О.И. Особенности функционирования Шагонарского плеса Саяно-Шушенского водохранилища и его влияние на экологическое состояние окружающей среды // Фундаментальные исследования. 2014. № 12. Ч. 7. С. 1452–1462.

Корниенко С.Г. Оценка трансформаций природных ландшафтов Тазовского полуострова по данным космической съемки // География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 67–73.

Кузьмина Ж.В.,. Новикова Н.М., Подольский С.А. Использование экотонной концепции для обоснования водоохранных зон прибрежных территорий // Институт водных проблем РАН, 2006. С. 79–83.

Курганова О.П., Явкина Е.Н., Ситникова Г.В. Обзор гидрологических особенностей наводнений в амурской области для выработки комплекса санитарнопротивоэпидемических мероприятий по минимизации социальных последствий // Проблемы особо опасных инфекций. 2014. № 1. С. 29–32.

Погорелов А.В., Липилин Д.А., Курносова А.С. Спутниковый мониторинг Краснодарского водохранилища // Географический вестник – Geographical bulletin. 2017. № 1(40). С. 130–137.

https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-1-130-137

Фролов А.А. Геоинформационно-картографический анализ изменчивости геосистем Юго-Западного Забайкалья // Геодезия и картография. 2020. № 2. Т. 81. С. 7–17.

Цой О.М. Математическое моделирование чрезвычайных ситуаций природного характера на юге Дальнего Востока. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2012. 192 с.

*Ichii K., Kawabata A., Yamaguchi Y.* Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990 // International J. Remote Sensing. T. 23. V. 18. P. 3873–3878.

https://doi.org/10.1080/01431160110119416

# Satellite Monitoring: The Changes of Subaqueous Landscapes of the Zeya Reservoir

# N. M. Legacheva<sup>1</sup> and A. A. Shehirev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Altay State University, Barnaul, Russia

Geo-information analysis of the coastline and area changes of subaqueous landscapes of the Zeya Reservoir was carried out from 1999 till 2016. The process of overgrowth subaqueous landscapes of confluences with rivers' reservoir of the Zeya basin was analysed. Methods of remote sensing of the Earth were used, the processing of space images with the using indexes MNDWI and NDVI was applied, the set of a territory maps in the program ArcGIS was made up. The rational usage of subaqueous landscapes of the Zeya Reservoir was described. The analysis of the compiled maps on the selected areas revealed that on the periodically flooded territory thinned vegetation and low productivity of photosynthetically active biomass was comitted on flood-plain soils due to sedimentation after the disastrous flood in 2013.

*Keywords*: the Zeya Reservoir, subaqueous landscapes, space images, water index MNDWI, vegetation index NDVI

#### REFERENCES

*Bondur V.G.* Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018. DOI: 10.1134/S0001433811090039

*Bondur V.G.* Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows. Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2014. V. 50. № 9. P. 840–852. DOI: 10.1134/S0001433814090060

Bondur V.G., Starchenkov S.A. Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskih izobrazheniy [Methods and programs for aerospace imagery processing and classification] // Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography. 2001. № 3. P. 118–143 (In Russian).

*Bondur V.G., Vorobev V.E.* Satellite Monitoring of Impact Arctic Regions // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2015. V. 51. № 9. P. 949–968. DOI: 10.1134/S0001433815090054

*Frolov A.A.* Geoinformaczionno-kartograficheskij analiz izmenchivosti geosistem Yugo-Zapadnogo Zabajkal'ya // Geodeziya i kartografiya. 2020. № 2. V. 81. P. 7–17 (In Russian).

Gopp N.V., Savenkov O.A., Nechaeva T.V., Smirnova N.V., Smirnov A.V. Ispol'zovanie NDVI v cifrovom kartografirovanii soderzhaniya fosfora v pochvah i ocenka obespechennosti im rastenij // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2019.  $\mathbb{N}$  2. P. 65–73 (In Russian).

*Ichii K., Kawabata A., Yamaguchi Y.* Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990 // International J. Remote Sensing. T. 23. V. 18. P. 3873–3878. DOI: 10.1080/01431160110119416

*Kal'naya O.I.* Osobennosti funkczionirovaniya Shagonarskogo plyosa Sayano-Shushenskogo vodokhranilishha i ego vliyanie na ekologicheskoe sostoyanie okruzhayushhej sredy // Fundamental'nye issledovaniya. 2014. № 12. Ch. 7. P. 1452–1462 (In Russian).

*Kornienko S.G.* Oczenka transformaczij prirodnykh landshaftov Tazovskogo poluostrova po dannym kosmicheskoj s"yomki // Geografiya i prirodnye resursy. 2011. № 1. P. 67–73 (In Russian).

*Kurganova O.P., Yavkina E.N., Sitnikova G.V.* Obzor gidrologicheskih osobennostej navodnenij v amurskoj oblasti dlya vyrabotki kompleksa sanitarno-protivoepidemicheskih meropriyatij po minimizacii social'nyh posledstvij // Problemy osobo opasnyh infekcij. 2014. № 1. P. 29–32.

*Kuz'mina Zh.V., Novikova N.M., Podol'skij S.A.* Ispol'zovanie ekotonnoj konczepczii dlya obosnovaniya vodookhrannykh zon pribrezhnykh territorij / Zh.V. Kuz'mina // Institut vodnykh problem Rossijskoj akademii nauk. 2006. P. 79–83 (In Russian).

*Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kurnosova A.S.* Sputnikovyj monitoring Krasnodarskogo vodokhranilishha // Geograficheskij vestnik – Geographical bulletin. 2017. № 1 (40). P. 130–137 (In Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-130-137

*Tsoy O.M.* Matematicheskoe modelirovanie chrezvychajnykh situaczij prirodnogo kharaktera na yuge Dal'nego Vostoka. M.: FGBU VNII GOChS (FCz), 2012. 192 p. (In Russian).

Vorotnikova N.V., Zubenkova M.A. Geoinformaczionnoe kartografirovanie antropogennoj narushennosti prirodnoj sredy promyshlennymi i tekhnogennymi proczessami na primere Zejskogo vodokhranilishha Amurskoj oblasti // Nauki o Zemle: vchera, segodnya, zavtra: materialy II Mezhdunarodnoj nauchnoj konferenczii (g. Moskva, iyun' 2016 g.). Moskva: Buki-Vedi, 2016. P. 10–12 (In Russian).

# ПЕРВЫЙ СОВЕТСКИЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ СПУТНИК (К 60-ЛЕТИЮ НАЧАЛА РАЗРАБОТКИ СПУТНИКОВ СЕРИИ "МЕТЕОР")

© 2021 г. Л.А. Ведешин\*

ФГБУН ИКИ РАН, Москва, Россия \*E-mail: vedeshin40@mail.ru Поступила в редакцию 09.12.2020 г.

DOI: 10.31857/S020596142102010X

Начиная с 1949 г. советские метеорологи уже имели представление о процессах, происходящих в верхних слоях атмосферы и космическом пространстве с помощью с метеорологических ракет MP-1, M-100, MP-12 и геофизических высотных зондов. На исследовательских ракетах серии P-1, 2 и 5, достигавших высот от 80 до 500 км, устанавливались контейнеры весом от нескольких сотен килограммов до тонны и более с различной метеорологической и геофизической аппаратурой, а также с животными для медико-биологических исследований. На них испытывались различные приборы и системы, которые в дальнейшем стали использоваться на метеоспутниках.

Впервые метеорологические измерения в СССР были выполнены на третьем ИСЗ, запущенном 15 мая 1958 г. На нем была установлена научная аппаратура для исследования верхних слоев атмосферы, которая позволила осуществить измерения давления и плотности воздуха на различных высотах.

В США в апреле 1960 г. был запущен первый метеоспутник "ТИРОС-1", передавший снимки земной поверхности и облачного покрова из космоса. Советское правительство понимало важность этих работ для развития Гидрометеорологической службы СССР и обороны страны, и 30 октября 1961 г. вышло Постановление Совета Министров СССР, согласно которому главному конструктору ОКБ-586 (ОКБ "Южное") М.К. Янгелю была поручена разработка метеоспутника в 1962-1963 гг. и создание на его базе отечественной космической метеосистемы. Заказчиком метеоспутников было назначено Главное управление гидрометеорологической службы СССР (ГУГМС), которое в те годы возглавлял крупный ученый в области метеорологии и геофизики акад. АН СССР Е.К. Федоров.

Разработка эскизного проекта метеоспутника осуществлялась на конкурсной основе в ОКБ-586 и во ВНИИ электромеханики (ВНИИЭМ) под руководством проф. А.Г. Иосифьяна. Оконча-

тельное решение о начале разработки метеоспутника было принято в конце 1961 г. на Межведомственном совете по космическим исследованиям (МНТС по КИ) под председательством акад. М.В. Келдыша в пользу проекта ВНИИЭМ в связи с уникальным предложением о создании трехосной системы ориентации и стабилизации космического аппарата (КА) с помощью 3-х электродвигателей-маховиков.

Пользуясь большим авторитетом у руководства страны, акад. М.К. Янгель добился разрешения на запуск с помощью созданной в ОКБ-586 ракетыносителя "Космос-2" первых двух метеоспутников, получивших название "Омега". В мае 1962 г. из ОКБ-586 во ВНИИЭМ была передана проектная документация КА "Омега" и направлена бригада специалистов для оказания помощи в дальнейшей ее доработке.

В течение 1962 г. во ВНИИЭМ в проект КА были внесены существенные изменения: гравитационная система ориентации (ГРС) и стабилизации была заменена на активную систему электродвигателей-маховиков, разработана система ориентации солнечных батарей и доработана конструкция аппарата. Для разгрузки маховиков была разработана ГРС, которая брала на себя создание управляющего воздействия при торможении маховика. Заводу № 586 было поручено изготовление и поставка корпусных узлов КА, ГРС, антенно-фидерных устройств и ряда других устройств. С реализации этой программы началось долгосрочное сотрудничество ОКБ-586 и ВНИИЭМ по созданию спутников серии (КА) "Метеор".

В короткие сроки оба спутника "Омега" были изготовлены и отправлены на космодром Капустин Яр. Первый спутник "Омега" ("Космос-14") был запущен 13.04.1963 г., второй – "Космос-23" – 14.12.1963 г. В полете на ИСЗ "Космос-14" и "Космос-23" были проверены принципы функционирования трехосной системы ориентации и стабилизации ИСЗ, созданной талантливым конструктором ВНИИЭМ А.И. Мельниковым. На спутниках была также исследована новая система преобразования солнечной энергии в электрическую с помощью кремниевых полупроводниковых фотопреобразователей, проведены испытания телевизионной аппаратуры метеоспутника. В полете КА впервые был опробован режим "закрутки" спутника с раскрытыми солнечными батареями вокруг оси, ориентированной на Солнце. Режим "закрутки" впоследствии широко использовался на пилотируемых кораблях "Салют" и орбитальном комплексе "Мир".

25 июня 1966 г. на орбиту был выведен первый экспериментальный метеоспутник "Космос-122", а весной 1967 г. состоялся запуск сразу двух спутников – "Космос-144" и "Космос-156" – которые образовали вместе с наземными пунктами первую экспериментальную метеосистему. Она в дальнейшем дополнялась аналогичными спутниками "Космос-184" и "Космос-206".

26 марта 1969 г. по заказу ГУГМС с космодрома Плесецк ракетой "Восток" на орбиту 650 км был запущен первый штатный метеоспутник "Метеор-1-1" весом 1200 кг, длиной 5 м и диаметром 2.5 м. На его борту размещалась телевизионная, инфракрасная и актинометрическая аппаратура. Полоса обзора КА составляла 2500 км, разрешение 50 × 50 км. В 1969 г. Постановлением Правительства СССР экспериментальная система "Метеор" была принята в эксплуатацию.

В 1971 г. под руководством директора и главного конструктора филиала ВНИИЭМ в Истре д. т. н. В.И. Адасько была организована сборка и испытания метеоспутников серии "Метеор". В 1975–1982 гг. на базе спутника "Метеор" в результате его модернизации был разработан оперативный метеоспутник второго поколения "Метеор-2", оснащенный служебной и информационной многозональной сканирующей аппаратурой МСУ-М и МСУ-С, разработанной д. т. н. А.С. Селивановым в НПО научного приборостроения. В 1982 г. в соответствии с Постановлением Правительства СССР метеосистема "Метеор-2" была принята в эксплуатацию, а ВНИИЭМ- определен головной организацией по спутнику "Метеор-2".

В 1980 г. специалисты ВНИИЭМ во главе с д. т. н. Ю.В. Трифоновым заменили информационный комплекс спутника "Метеор-2" на систему для изучения природных ресурсов Земли (ИПРЗ). В результате летных испытаний была создана новая серия спутников "Метеор-Природа". Надо отметить преемственность технических решений в СССР и США: спутники ДЗЗ первого поколения "Метеор-Природа" и "Landsat" были созданы на основе использования систем и конструкции метеоспутников "Метеор" и "Nimbus" с возможностью замены системы информационных приборов для ДЗЗ и метеорологии.

Под руководством Главного конструктора ВНИ-ИЭМ д. т. н. А.Г. Иосифьяна и д. т. н. Ю.В. Три фонова в 1975–1980 гг. была разработана универсальная космическая платформа СП-1, которая позволила на ее базе изготавливать различные по назначению КА: для ИПРЗ "Метеор-Природа", "Ресурс-О1", "Ресурс-ОЭ" (1980–2000 гг.), для изучения ионосферы и магнитосферы Земли "Интеркосмос-Болгария-1300" (1981–1983 гг.), для обнаружения и определения координат наземных ядерных взрывов "Астрофизика" (1978–1979 гг.).

В последующие годы во ВНИИЭМ были разработаны: метеоспутник "Метеор-3" (1985– 1997 гг.) и многоцелевой аппарат "Метеор-3М" (1991–2001 гг.), которые наряду со штатными метеорологическими наблюдениями использовались для международного сотрудничества по программе "Интеркосмос": на КА "Метеор-3/ТОМС" в 1991 г. была установлена аппаратура США для исследования озонового слоя Земли, а в 2001 г. на "Метеор-3М/SAGE" – приборы для изучения физики атмосферы.

В 1994 г. был запущен первый геостационарный гидрометеорологический КА "Электро", разработанный во ВНИИИЭМ. Он каждые полчаса передавал многоспектральные изображения диска Земли с высоким пространственным разрешением и измерительной точностью для обеспечения метеорологов многими видами информации, в том числе гелиогеофизические измерениями.

В 2009 г. во ВНИИЭМ была разработана новая серия низкоорбитальных метеоспутников "Метеор-М" № 1 (2009 г.), "Метеор-М № 2 (2014 г.) и "Метеор-М" № 3 (2001 г.). Для научных исследований были созданы КА "Коронас-Фотон" (2009 г.), "Университетский-Татьяна-2" (2009 г.), "Ломоносов" (2016 г.) и др.

С 2014 г. ВНИИЭМ возглавил генеральный директор – генеральный конструктор д. т. н. Л.А. Макриденко. Под его руководством была разработана серия из шести малых космических аппаратов (МКА) для ИПРЗ и метеорологии "Канопус-В" (2012–2018 гг.), Белорусский КА (2012 г.) и метеорологические КА "Метеор-М". Запуск еще четырех спутников "Метеор-М" и двух КА "Канопус" намечается на 2021–2025 гг. В период до 2025 г. планируется разработка и запуск четырех КА "Ионосфера" для изучения процессов и явлений, происходящих в ионосфере.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема "Мониторинг", госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

# ПАМЯТИ ОЛЕГА ВИКТОРОВИЧА КОПЕЛЕВИЧА



С глубоким прискорбием извещаем, что 28 декабря 2020 г. ушел из жизни прекрасный человек, выдающийся ученый, океанолог, оптик, доктор физико-математических наук, заведующий Лабораторией оптики океана Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, член редколлегии журнала "Исследование Земли из космоса" Олег Викторович Копелевич.

Олег Викторович Копелевич родился 14 июля 1940 г. в Москве. В 1965 г. по окончании Московского физико-технического института Олег Викторович начал свою научную деятельность в Институте океанологии АН СССР. Работе в этом Институте он посвятил всю свою жизнь. За 55 лет Олег Викторович прошел путь от стажера-исследователя до главного научного сотрудника, заведующего лабораторией и всемирно известного ученого.

В Институте он начал заниматься изучением рассеяния света морской воды и его зависимости от состава морской взвеси. Впервые ввел в практику экспедиционных исследований точный метод измерения рассеяния в области малых углов, наиболее важный как с точки зрения распределения энергии рассеянного света, так и для решения обратной задачи рассеяния.

В 1972 г. Олег Викторович защитил кандидатскую диссертацию на тему "Исследование рассеяния света морской водой". В последующие годы под его руководством был создан новый комплекс аппаратуры для исследования оптических свойств океанской воды, включающий приборы для измерения светорассеяния в области малых углов, спектральных показателей поглощения и ослабления в ультрафиолетовой области. В 1982 г. О.В. Копелевич защитил докторскую диссертацию на тему "Оптические свойства океанской воды". В 1983 г. он провел первые комплексные оптические исследования вод Амазонки и ее притоков Риу-Негру и Солимойнса.

О.В. Копелевич одним из первых использовал данные оптических спутниковых съемок для решения задач мониторинга морской среды. Уже в 1976—1978 гг. он принял активное участие в разработке алгоритмов обработки данных спутникового многоканального спектрометра Международной космической станции (МКС), создаваемого совместно со специалистами Института электроники АН ГДР в рамках программы "Интеркосмос".

Начиная с 1993 г. он активно развивал методы использования данных спутниковых сканеров цвета для исследования и мониторинга морей и океанов. Под его руководством сотрудниками Лаборатории оптики океана выполнены работы по использованию спутниковых наблюдений сканерами цвета за 20 лет – с 1998 по 2017 гг.

О.В. Копелевич участвовал в международных научных группах по спутниковым проектам SeaWiFS, SIMBIOS, ADEOS-2 (1993–2004 гг.) и по проекту "Последствия возросшего ультрафиолетового облучения в Арктике" (1994–1995 гг.). Он был членом Международной координационной группы по цвету океана (1997–2001 гг.) и российско-американской рабочей группы PAH-NASA "Науки о Земле", соруководителем проектов Федеральной целевой программы "Мировой океан".

О.В. Копелевич был членом ученого совета Института океанологии РАН, председателем Диссертационного совета ИО РАН (2002–2007 гг.) и заместителем председателя Диссертационного совета ИО РАН (с 2008 г.).

Олег Викторович на протяжении многих лет являлся членом редколлегий журналов "Океанология", "Исследование Земли из космоса", "Фундаментальная и прикладная гидрофизика", "Remote Sensing" и "Journal of Marine Science and Engineering".

О.В. Копелевич — автор и соавтор более 200 научных работ и 10 коллективных монографий, участник 18 океанических экспедиций. Лауреат премии Совета Министров СССР за работу в области радиоэлектроники (1990 г.), лауреат Премии на конкурсе МАИК "Наука" за цикл статей "Использование данных спутниковых наблюдений цвета вод в океанологических исследованиях", опубликованных в 1999—2001 гг. (2002 г.). Награжден Знаком К.Э. Циолковского (2008 г.) и медалями "За международное сотрудничество в области космических исследований" (2009 г.), А.А. Лебедева оптического общества им. Д.С. Рождественского (2010 г.), а также юбилейными медалями "300 лет Российскому флоту" и "В память 850-летия Москвы".

Имя Олега Викторовича Копелевича навсегда останется в истории российской и мировой науки, а память о нем — в сердцах его коллег, учеников и друзей. Редколлегия журнала "Исследование Земли из космоса" выражает соболезнования родным и близким Олега Викторовича.