

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Номер 4, 2022

---

---

## Использование космической информации о Земле

Корреляция наземных и спутниковых измерений концентрации метана в приземном слое атмосферы в районе Тикси <i>Н. В. Родионова</i>	3
Оценка гидрологических изменений водно-болотных угодий Российской Арктики, Субарктики и северной тайги по данным микроволнового дистанционного зондирования <i>А. Н. Романов, И. В. Хвостов, В. В. Тихонов, Е. А. Шарков</i>	12
Холодное пятно над Лофотенским вихрем <i>В. С. Травкин, Т. В. Белоненко, А. А. Кубряков</i>	25
Динамические параметры изменений оползневых очагов в криолитозоне по материалам дистанционных съемок (на примере о. Банкс) <i>Т. В. Орлов, М. В. Архипова, В. В. Бондарь</i>	38
О долговременной стабильности положения топливных резервуаров Норильской ТЭЦ-3 по данным PCA Sentinel-1 <i>А. И. Захаров, Л. Н. Захарова</i>	53
Моделирование и исследование параметров водохранилища проектируемой ГЭС “Камбарата-1” на основе космических данных <i>А. У. Чымыров, Д. Т. Чонтоев, К. Е. Абдрахматов, Б. М. Жакеев</i>	66

---

## Методы и средства обработки и интерпретации космической информации

Определение общего содержания озона в столбе атмосферы по данным КА Электро-Л № 3 с использованием нейронных сетей <i>В. Д. Блощинский, М. О. Кучма, А. В. Кухарский</i>	79
Использование ГИС-технологий для создания локальной геоинформационной системы учета орошаемых угодий <i>Е. В. Денисова</i>	86

---

---

# Contents

---

---

No. 4, 2022

---

---

## Utilization of the Earth Space Data

Correlation of Ground-Based and Satellite Measurements of Methane Concentration in the Surface Layer of The Atmosphere in the Tiksi Region <i>N. V. Rodionova</i>	3
Assessment of Hydrological Changes in Wetlanded Areas of the Arctic and Subarctic According to Remote Microwave Sensing Data <i>A. N. Romanov, I. V. Khvostov, V. V. Tikhonov, E. A. Sharkov</i>	12
Cold Spot over the Lofoten Vortex <i>V. S. Travkin, T. V. Belonenko, A. A. Kubryakov</i>	25
Dynamic Parameters of Landslide Focus Changes in Cryolithozone (Banks Island Case Study) <i>T. V. Orlov, M. V. Arkhipova, V. V. Bondar</i>	38
On The Long-Term Stability of the Norilsk TPP-3 Fuel Tanks Dynamics According to Sentinel-1 SAR Data <i>A. I. Zakharov, L. N. Zakharova</i>	53
Modeling and Study of Parameters of the Under-Construction Kambarata-1 HPP Reservoir on Base of Satellite Data <i>A. U. Chymyrov, D. T. Chontoev, K. E. Abdrakhmatov, B. M. Zhakeev</i>	66

---

## Methods and Means of Space Data Processing and Interpretation

Determination of the Total Ozone Content in Atmospheric Column according to the Data of Electro-L No. 3 Spacecraft Using Neural Networks Satellite <i>V. D. Bloshchinskiy, M. O. Kuchma, A. V. Kukharsky</i>	79
The Use of GIS Technologies to Create a Local Geoinformation System for the Accounting of Irrigated Lands <i>E. V. Denisova</i>	86

---

---

---

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

---

---

**КОРРЕЛЯЦИЯ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ  
В РАЙОНЕ ТИКСИ**

© 2022 г. Н. В. Родионова\*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,  
Фрязино, Московская обл., Россия**\*E-mail: rnv1948123@yandex.ru*

Поступила в редакцию 25.01.2022 г.

В работе определена корреляция AIRS/AQUA спутниковых измерений концентрации метана в приземном слое атмосферы с наземными измерениями на стационаре ГГО им. А.И. Воейкова в Тикси в 2011–2020 гг. Корреляция спутниковых измерений с наземными меняется в зависимости от сезона. Весной и летом корреляция превышает осеннюю и значительно зимнюю. Для зимнего периода (декабрь, январь, февраль) снижение корреляции связано с возможными инверсиями температуры воздуха (Юрганов и др., 2016; Анисимов, Кокорев, 2015). При температурном контрасте (ТК) меньше 10°C (разница температуры воздуха на поверхности и на уровне 600 гПа (4 км)) преимущественно использовать спутниковые данные, усредненные на уровнях 400–500 гПа. Это дает увеличение коэффициента корреляции Спирмена (ККС) между наземными и спутниковыми измерениями с 0.44 (1000 гПа) до 0.63 (400–500 гПа). Однако, полученное регрессионное соотношение с коэффициентом детерминации 0.44 делает проблематичным использование его для прогноза наземных данных по спутниковым измерениям.

*Ключевые слова:* наземные измерения, спутниковые измерения, концентрация метана в атмосфере, коэффициент корреляции Спирмена

**DOI:** 10.31857/S0205961422040054**ВВЕДЕНИЕ**

Метан (CH<sub>4</sub>) – один из парниковых газов. По сравнению с другими парниковыми газами метана в атмосфере содержится меньше, но по степени парниковой активности он более, чем в 20 раз превосходит данный показатель для углекислого газа (IPCC, 1995). Источники метана естественные (болота и влажная почва, пресноводные водоемы, дикие животные, природные пожары, термиты, геологические источники, метангидраты, таяние вечной мерзлоты) и антропогенные (сельское хозяйство, ископаемое топливо, сжигание биомассы). Наряду с атмосферой метан содержится в земле в виде природного газа. Еще одним источником метана на земле являются газогидраты, которые могут существовать в условиях либо высокого давления (в океане), либо очень холодного климата (на суше в регионах с вечной мерзлотой). Газогидраты на суше могут разрушаться с выделением CH<sub>4</sub> при потеплении климата, в океане при уменьшении его уровня (Елисеев, 2018). В Арктической зоне температура воздуха растет в полтора-два раза быстрее, чем в среднем по Земле, что стимулирует активность многих естественных источников метана, оказы-

вает воздействие на вечную мерзлоту, высвобождая в огромных количествах метан и другие малые газовые компоненты (Стародубцев, 2018).

Важнейшим стоком метана в атмосфере, составляющим почти 90% от полной интенсивности стока, является его разрушение при реакции с гидроксил-радикалом OH с образованием углекислого газа и паров воды (Cicerone, Oremland, 1988). В зимние месяцы, когда процессы стока метана прекращаются, метан начинает накапливаться в атмосфере, а летом включаются процессы стока метана (Белан, Креков, 2012).

Наземные измерения метана вблизи поверхности немногочисленны. В Арктике регулярные измерения метана в России проводятся в двух пунктах: Тикси и Териберке. Данные этих наблюдений собраны и систематизированы исследовательской группой NOAA, результаты представлены на интернет портале <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/>. В качестве спутниковых измерений в работе использовались данные дистанционного зондирования американского спутника AQUA с помощью спектрометра AIRS (Atmospheric Infrared Sounder).

Цель работы - определить корреляцию наземных измерений значений концентрации метана в



Рис. 1. Спутниковое изображение района расположения поселка Тикси.

приземном слое атмосферы на стационаре Тикси, расположенном в арктической зоне, и спутниковых измерений инфракрасным спектрометром AIRS, установленном на спутнике EOS AQUA.

### НАЗЕМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Станция фонового мониторинга “Тикси” находится на побережье моря Лаптевых, координаты станции  $71.586166^{\circ}$  N,  $128.91882^{\circ}$  E (рис. 1, красная звездочка). На станции Тикси работы по наблюдению за метаном ведутся с 2011 г. Пробы  $\text{CH}_4$  на станции отбираются круглогодично раз в неделю вакуумированными флягами. Для измере-

ния концентраций газовых компонент на ст. Тикси используется газоанализатор Picarro G2301.

Данные по наземным измерениям концентрации метана в приземном слое атмосферы для стационара в Тикси находятся в свободном доступе на сайте WDCGG (World Data Centre Greenhouse Gases) <https://gaw.kishou.go.jp/>. В настоящей работе использованы измерения концентрации метана в приземном слое атмосферы, полученные на стационаре Главной Геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) в Тикси (Ivakhov, Paramonova, 2021).

На рис. 2, а показаны графики вариаций среднемесячной концентрации метана по наземным измерениям на стационаре ГГО Тикси для 2011–2020 гг. Отмечаем минимум концентрации метана в июле (кроме 2020 г.) и максимум в сентябре–октябре. На рис. 2, б приведен график межгодовых вариаций концентрации  $\text{CH}_4$  по наземным измерениям на стационаре Тикси со стабильным ростом значений и линией тренда с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0.97$ . К сожалению, данных для 2016 г. было недостаточно (есть данные только для первых трех месяцев), а для 2017 г. отсутствовали данные за январь, февраль. В результате измерения за эти годы не вошли в график межгодовых вариаций.

В зимнее время происходит накопление метана в атмосфере, в летнее – сток, т.е. есть обратная корреляция с температурой воздуха. На рис. 3 приведен график вариаций концентрации метана по регулярным (раз в неделю) наземным измерениям на стационаре Тикси для 2013 г. и график значений температуры воздуха по архивным данным для аэропорта Тикси (сайт gr5.ru) на момент взятия проб метана. Очевидна отрицательная корреляция этих данных. В табл. 1 приведены значения ККС между температурой воздуха и на-

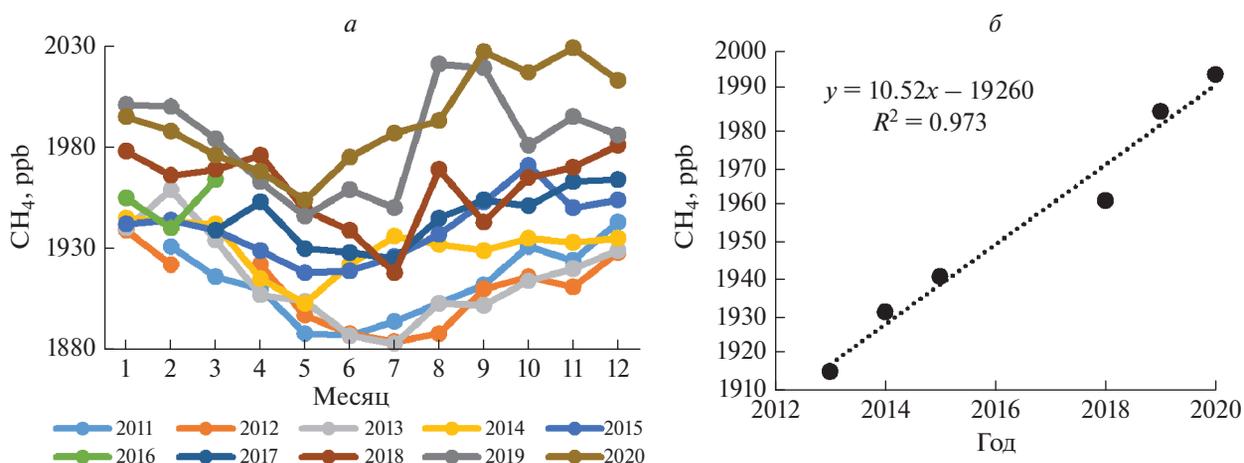
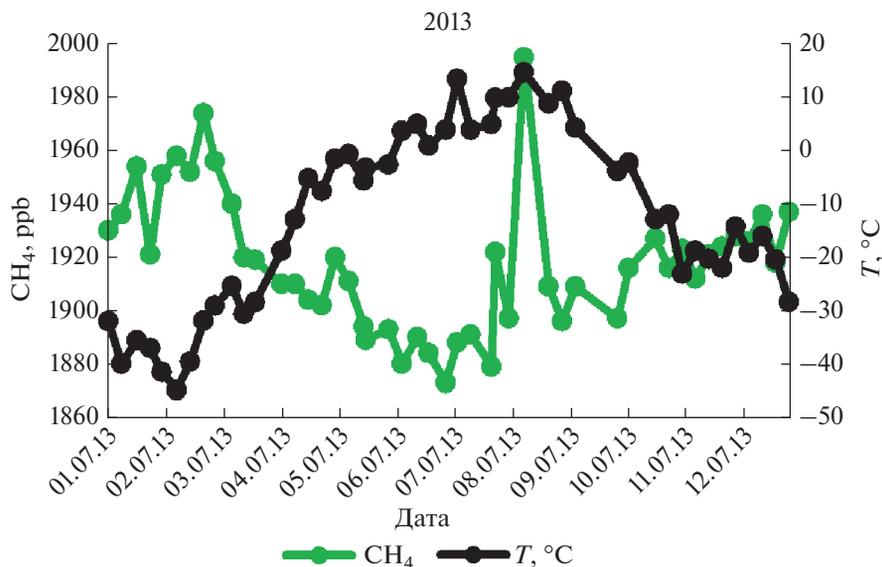


Рис. 2. Сезонные и межгодовые вариации концентрации метана в приземном слое атмосферы по наземным измерениям на станции фонового мониторинга ГГО Тикси.



**Рис. 3.** Графики вариаций концентрации метана по регулярным наземным измерениям на стационаре в Тикси для 2013 г. и значений температуры воздуха.

земными измерениями концентрации метана в приземном слое атмосферы на стационаре в Тикси для периода 2011–2018 гг., где  $\rho_s$  — коэффициент корреляции Спирмена,  $p$  — значение,  $N$  — число измерений.

### СПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА

С 2002 г. начались измерения спектров инфракрасной (тепловой) радиации, излучаемой земной поверхностью, на американском спутнике AQUA с помощью спектрометра AIRS. Содержание метана в тропосфере оценивается по ослаблению излучения в спектральных диапазонах, соответствующих максимумам полос поглощения этого газа. Данные о содержании метана в атмосфере находятся в свободном доступе в системе анализа и визуализации данных Giovanni, доступные по ссылке <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>.

На рис. 4 приведены графики сезонных (а) и межгодовых (б) вариаций концентрации метана в приземной атмосфере в районе Тикси, по среднемесячным данным AIRS, усреднение по территории  $71^{\circ}.5833\text{--}71^{\circ}.6382\text{ N}$ ,  $128^{\circ}.86\text{--}128^{\circ}.9355\text{ E}$ , (продукт AIRS3STM v.7.0), барическая высота 1000 гПа, пространственное разрешение  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , на период 2011–2018 гг. Приведены также (рис. 4, б) стандартные отклонения от средних значений по ежедневным данным AIRS. Отметим, что рост значений  $\text{CH}_4$  в осеннее время сопровождается ростом стандартного отклонения, особенно заметного для 2021 г. Существенным отличием сезонного хода концентраций метана по наземным измерениям (рис. 2, а) от спутниковых (рис. 4, а)

является значительное уменьшение значений концентрации метана в зимний сезон по спутниковым данным. О возможной причине будет сказано ниже.

На рис. 5 показаны среднемесячные карты распределения метана для области  $71^{\circ}\text{--}72^{\circ}\text{ N}$ ,  $128^{\circ}\text{--}131^{\circ}\text{ E}$ , включающей Тикси, по данным AIRS для 2021 г. (зеленой звездочкой на карте отмечено место расположения п. Тикси).

### КОРРЕЛЯЦИЯ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

Определим корреляцию наземных измерений концентрации метана в приземном слое атмосферы на стационаре в Тикси со спутниковыми ежедневными измерениями AIRS (продукт AIRS3STD v7.0), уровень 1000 гПа, пространственное разрешение  $1^{\circ}$  по широте и долготе. Корреляция определяется с помощью программы Attestat, находящейся в свободном доступе, и используемой как надстройка в Excel. В табл. 2 приведены значения ко-

**Таблица 1.** Коэффициент корреляции Спирмена между наземными измерениями концентрации метана в приземном слое атмосферы и температурой воздуха

	2011	2012	2013	2014	2015	2017	2018
$\rho_s$	-0.52	-0.66	-0.69	-0.2	-0.21	-0.32	-0.26
$p$	$1.5\text{e-}4$	$2\text{e-}6$	0	0.07	0.06	0.02	0.04
$N$	44	39	47	51	51	37	46

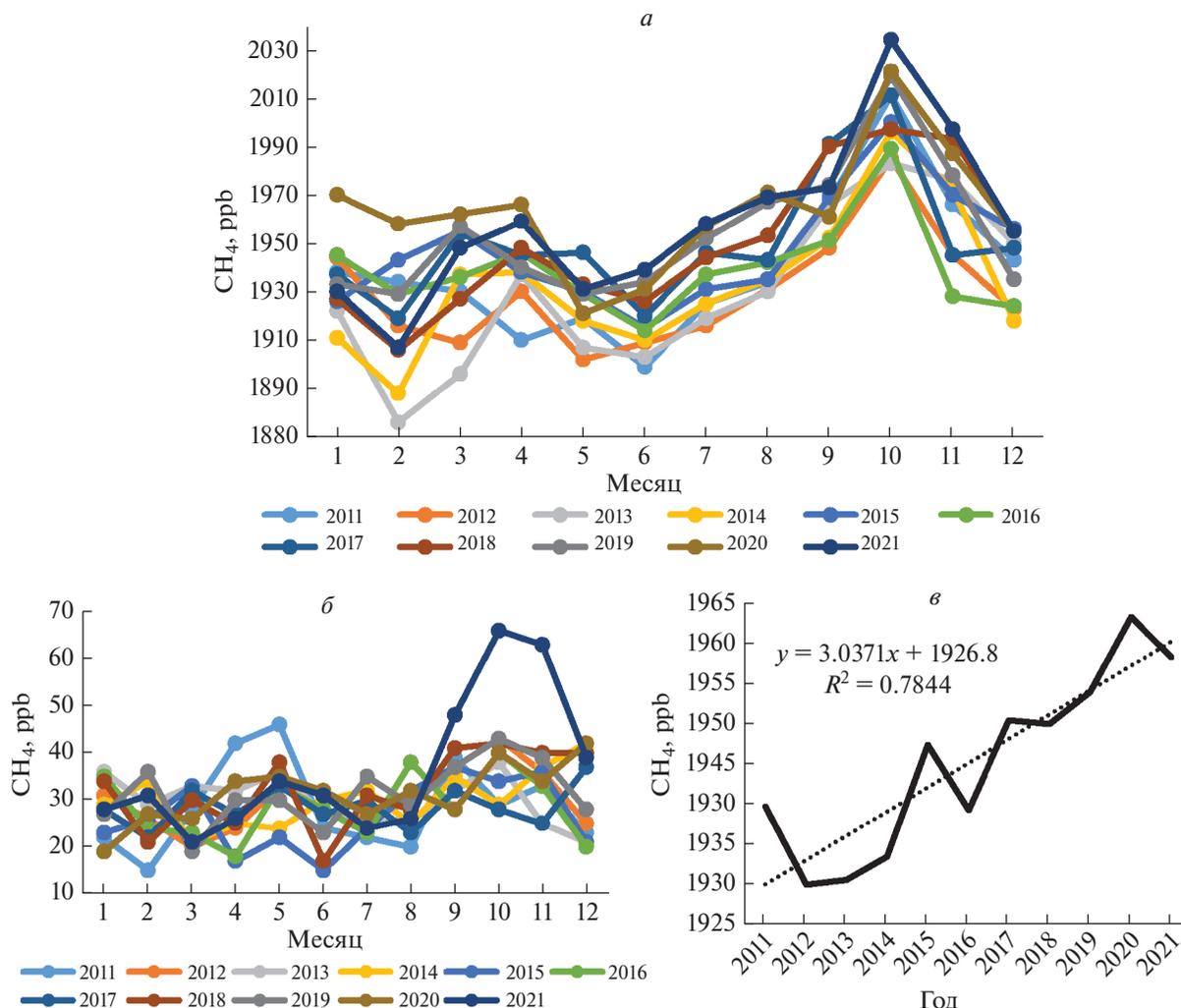


Рис. 4. Сезонные вариации (а), стандартные отклонения (б) и межгодовые (в) вариации концентрации метана в атмосфере уровня 1000 гПа в районе Тикси по данным AIRS.

эфициента корреляции Спирмена (ККС) между значениями концентрации метана по наземным и спутниковым данным. Отмечаем наличие положительной корреляции для 2011, 2012, 2015 и 2018 гг., и отсутствие корреляции для 2013, 2014, 2017 гг. Для 2014 г. (отсутствие корреляции) и 2015 года (положительная корреляция) на рис. 6 показаны графики вариаций концентрации  $\text{CH}_4$  для наземных и спутниковых данных.

Таблица 2. Коэффициент корреляции Спирмена между наземными и спутниковыми значениями концентрации метана в приземном слое атмосферы

	2011	2012	2013	2014	2015	2017	2018
$\rho_s$	0.48	0.33	-0.19	-0.03	0.42	0.12	0.27
$p$	2e-3	0.03	0.13	0.43	2e-3	0.25	0.05
$N$	33	33	36	47	43	32	37

Приборы AIRS, использующие уходящее излучение Земли в средней ИК области около 7.8 мкм, имеют пониженную чувствительность к нижней тропосфере. Для надежного определения концентраций атмосферных газов ниже высоты 5 км необходим достаточно большой положительный температурный контраст (ТК) между температурами подстилающей поверхности и пограничного слоя с одной стороны и температурами вышележащих слоев воздуха – с другой (Юрганов и др., 2016). Можно предположить, что для  $\text{TK} < 10^\circ\text{C}$  измеренная со спутника концентрация метана понижена (Юрганов и др., 2016). Основная причина снижения спутниковых значений концентрации метана в зимний сезон в том, что спутник не видит поверхность и значения концентрации метана определяет не у поверхности, а в более высоких слоях (Юрганов и др., 2016). Это происходит, если разность температур на поверхности

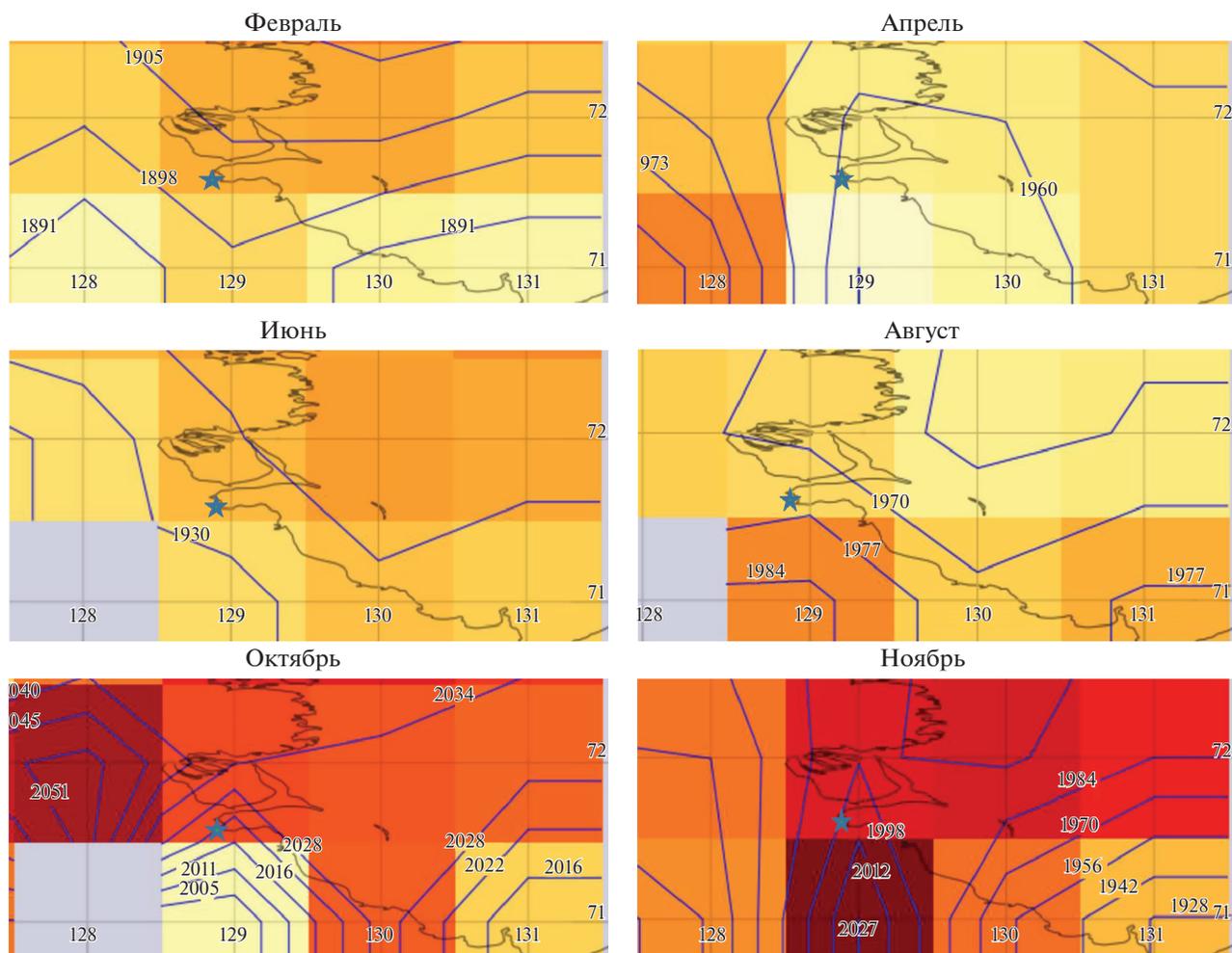


Рис. 5. Среднемесячные карты распределения метана по данным AIRS для 2021 г.

(уровень 1000 гПа) и на высоте порядка 4 км (600 гПа) меньше  $10^{\circ}\text{C}$ , т.е. температурный контраст (ТК) меньше  $10^{\circ}\text{C}$ . На рис. 7 показано значение ТК для Тикси на период 2011–2021 гг. Значения температуры для разных слоев атмосферы получены по месячным данным спутника AIRS с пространственным разрешением  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  (продукт AIRS3STM v7.0). Для января, февраля значения ТК практически для всех лет меньше  $10^{\circ}\text{C}$ .

На основании того, что наибольшие отклонения значений спутника от наземных из-за температурной инверсии в атмосфере происходят в зимние месяцы, найдем корреляцию наземных и спутниковых данных (1000 гПа) для 4-х сезонов: зима – 1, 2, 12 мес.; весна – 3, 4, 5 мес.; лето – 6, 7, 8 мес.; осень – 9, 10, 11 мес. На рис. 8 приведены графики значений концентрации метана в приземном слое атмосферы (1000 гПа) по наземным и спутниковым данным по сезонам: зима, весна, лето, осень. Отметим, что для зимнего сезона спутниковые значения занижены относительно наземных. Весной и летом наземные и спутнико-

вые значения концентрации метана находятся практически на одном уровне. Для осени спутниковые значения превосходят наземные, за исключением 2019 и 2020 гг.

Как было отмечено выше, проблема с выбором барических уровней для оценки концентраций метана в приповерхностном слое атмосферы по спутниковым данным состоит в том, что спутник не ‘видит’ слои атмосферы, прилегающие к поверхности из-за наличия выше более теплых слоев. Так, в работе (Анисимов, Кокорев, 2015) авторы для анализа использовали спутниковые данные, усредненные по третьему и четвертому барическим уровням AIRS- (850–700 гПа), что соответствует примерно высоте от 1.5 до 3 км. В работе (Стародубцев, 2018) использовался барический уровень 400 гПа, выбор которого был обусловлен рекомендациями, представленными в работе (Xiong et al., 2008), где уровень 400–500 гПа (~6–5 км) предлагался как наиболее эффективный для оценки концентрации метана в арктической зоне.

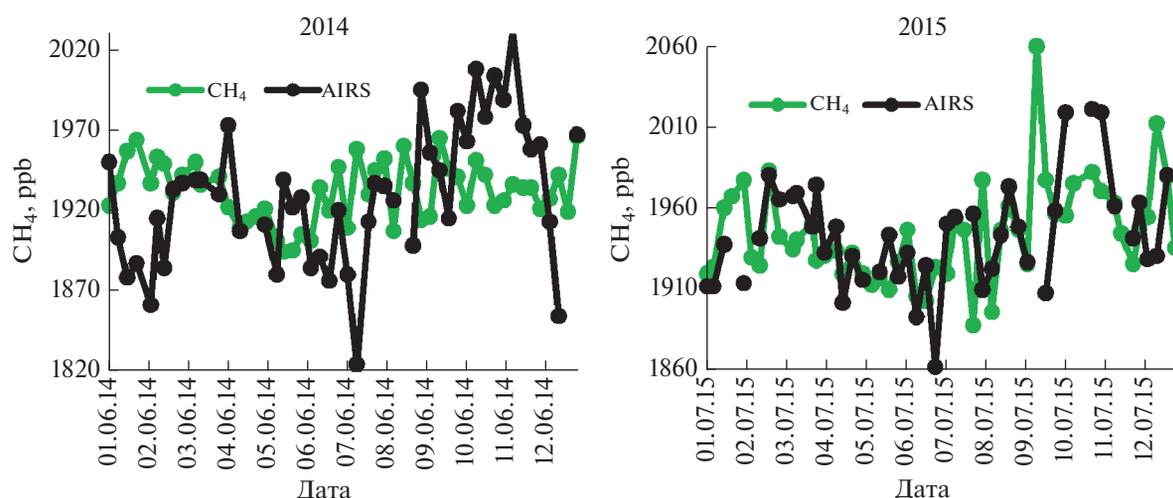


Рис. 6. Вариации концентрации  $\text{CH}_4$  в приземной атмосфере по наземным и спутниковым измерениям для Тикси в 2014 и 2015 гг.

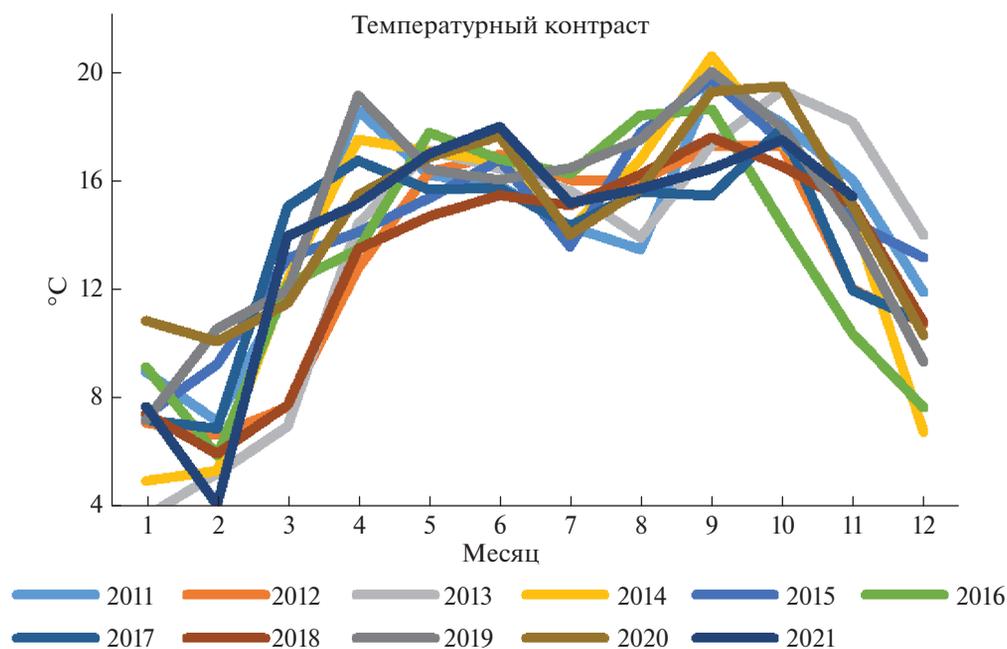


Рис. 7. Графики значений температурного контраста для Тикси на период 2011–2021 гг.

Чтобы выяснить, какой барический уровень лучше использовать для измерения концентрации метана, найдем корреляцию наземных данных со спутниковыми для трех барических уровней: 1 – 1000 гПа, 2 – усредненный по уровням 700 и 850 гПа и 3 – усредненный по уровням 400 и 500 гПа. В табл. 3 приведены полученные значения ККС для 4-х сезонов 2011–2020 гг. Для зимнего сезона значения ККС наименьшие в сравнении с остальными сезонами и составляют  $\rho_s = 0.38$  (1000 гПа),  $\rho_s = 0.43$  (700–850 гПа),  $\rho_s = 0.49$  (400–500 гПа). Для весеннего сезона ККС меня-

ется от 0.59 (1000 гПа), 0.74 (400–500) до 0.76 (700–850 гПа). Здесь преимущественным для измерения является барический уровень 700–850 гПа. Для летнего сезона значение ККС наибольшее для измерений на уровне 1000 гПа и составляет 0.71. Для осеннего периода предпочтением является измерение значений концентрации метана на барическом уровне 400–500 гПа, для которого ККС составляет 0.74 в сравнении с 0.42 для уровня 1000 гПа. Вывод по всем четырем сезонам таков: есть существенное преимущество по корреляции между значениями наземных и спутниковых

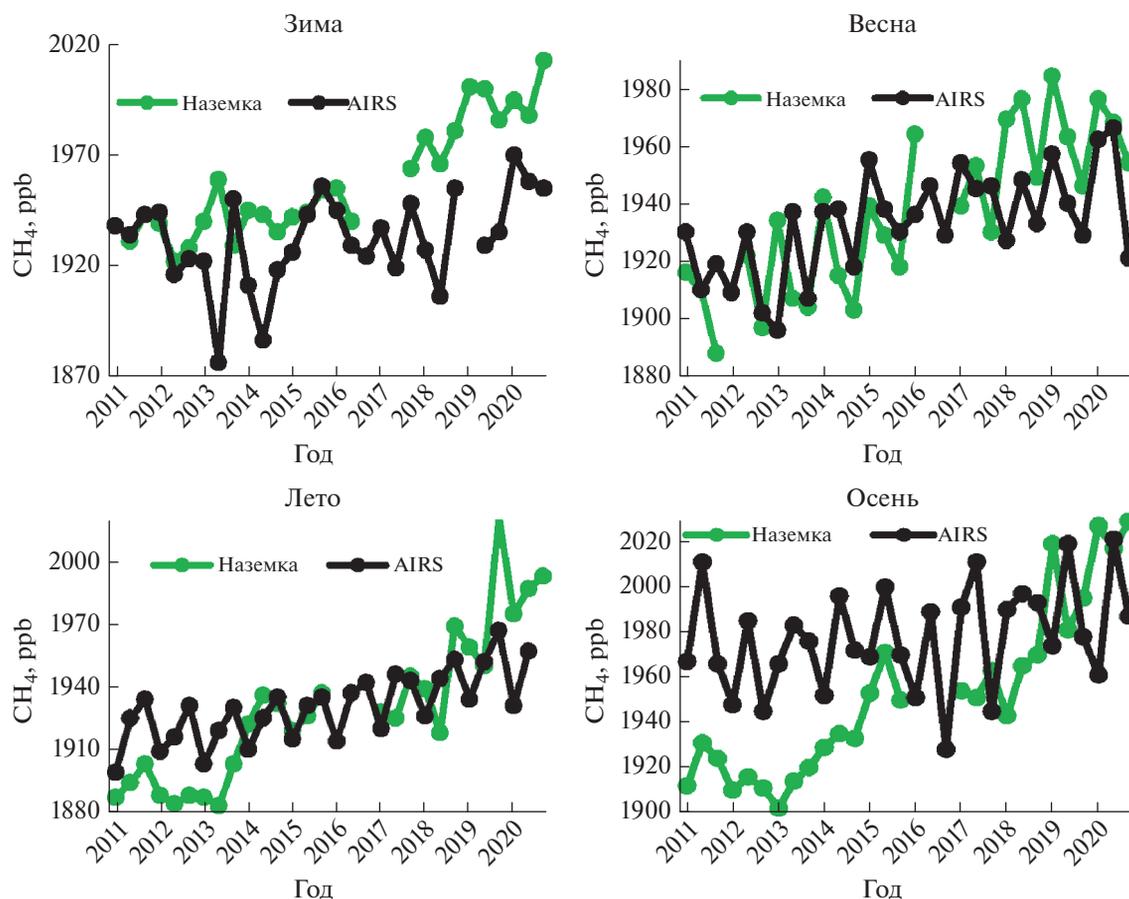


Рис. 8. Вариации концентрации  $\text{CH}_4$  в приземном слое атмосферы в районе Тикси по наземным и спутниковым данным AIRS барического уровня 1000 гПа для 4-х сезонов 2011–2020 гг.

измерений при измерении последних на барических уровнях 700–850 гПа или 400–500 гПа вместо барического уровня 1000 гПа.

При определении ККС между наземными данными и спутниковыми измерениями на разных барических высотах для выборки из измерений для четырех сезонов с 2011 по 2020 гг. ( $N \sim 105$ ), показано, что ККС для уровня 1000 гПа равен  $\rho_s = 0.44$  ( $p = 1e-7$ ), для уровня 700–850 гПа  $\rho_s = 0.557$  ( $p = 0$ ) и для уровня 400–500 гПа  $\rho_s = 0.63$  ( $p = 0$ ). Определилось преимущество использования для спутниковых измерений барического уровня 400–500 гПа из-за более высокой корреляции между наземными и спутниковыми измерениями.

На рис. 9, а приведен график регрессионного соотношения между наземными данными на стационаре Тикси и спутниковыми AIRS измерениями концентрации метана на барическом уровне 400–500 гПа за 2011–2020 гг. с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0.44$ . Сравнение значений концентрации метана по полученной регрессии с наземными данными на стационаре Тикси для 2020 г. выявили значения невязки 6–59 ppb (рис. 9, б),

причем значения невязки наименьшие для весеннего сезона.

Следует отметить, что регрессионная модель получена для Тикси и имеет локальную область применения, ограниченную территориями со сходными с Тикси климатическими условиями.

На корреляцию между наземными и спутниковыми данными влияет еще и то, что наземные измерения проводятся локально на небольшой территории, а пространственное разрешение спутниковых измерений AIRS/AQUA составляет  $1^\circ \times 1^\circ$ . Кроме того, Тикси находится на побережье моря Лаптевых, и спутник при данном пространственном разрешении видит не только континентальную часть, но и захватывает морскую поверхность, что также влияет на корреляцию наземных и спутниковых данных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе определена корреляция AIRS/AQUA спутниковых измерений концентрации метана в приземном слое атмосферы с наземными измерениями на стационаре ГГО им. А.И. Воейкова в

**Таблица 3.** Корреляция наземных и спутниковых измерений концентрации метана в атмосфере в районе Тикси при разных барических уровнях AIRS измерений

	1000 гПа			
	зима	весна	лето	осень
$\rho_s$	0.38	0.59	0.71	0.42
$p$	0.03	5e-4	2e-5	0.015
$N$	26	27	26	27
	700–850 гПа			
$\rho_s$	0.43	0.76	0.66	0.53
$p$	0.02	3e-6	2e-5	3e-3
$N$	26	26	27	26
	400–500 гПа			
$\rho_s$	0.49	0.74	0.62	0.74
$p$	5e-3	2e-5	2e-5	4e-6
$N$	26	24	26	27

Тикси в 2011–2020 гг. Выявлена отрицательная корреляция наземных данных концентрации метана в приземной атмосфере с температурой воздуха, что связано с периодами эмиссии и стока метана в атмосфере. Корреляция спутниковых AIRS измерений концентрации метана с наземными меняется в зависимости от сезона. Весной и летом корреляция превышает осеннюю и особенно зимнюю. Для зимнего периода (декабрь, январь, февраль) снижение корреляции связано с возможными инверсиями температуры воздуха (Юрганов и др., 2016). При температурном контрасте ТК меньше 10°C при сравнении спутниковых данных с наземными рекомендуется рассматривать значения спутника не на уровне 1000 гПа, а использовать усредненное значение на уровнях

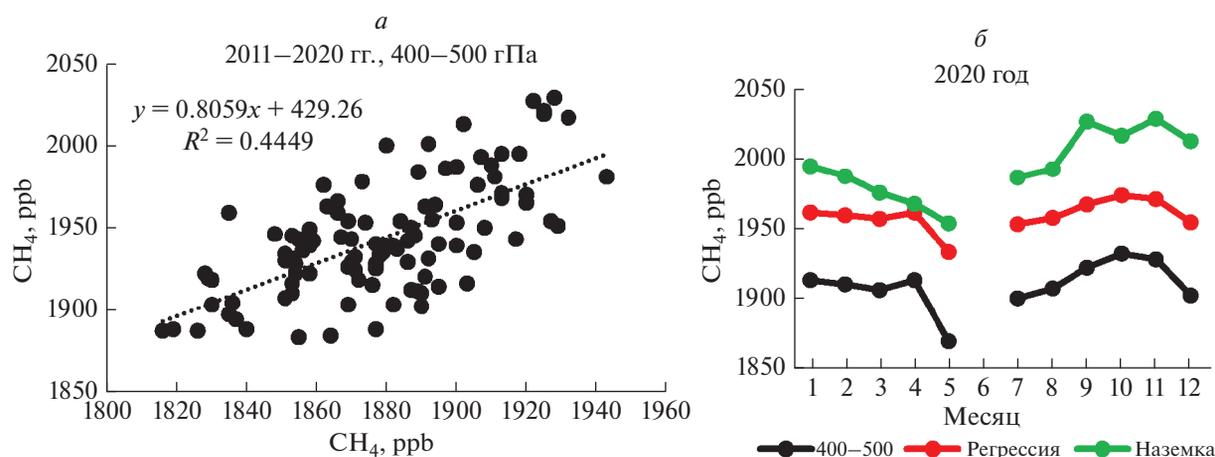
400–500 гПа. При определении ККС между наземными данными и спутниковыми измерениями на разных барических уровнях для выборки из измерений для четырех сезонов с 2011 по 2020 гг. ( $N \sim 105$ ), показано, что ККС для уровня 1000 гПа равен  $\rho_s = 0.44$ , для уровня 700–850 гПа  $\rho_s = 0.557$  и для уровня 400–500 гПа  $\rho_s = 0.63$ . Регрессионное соотношение для уровня 400–500 гПа имеет значение коэффициента детерминации  $R^2 = 0.44$ . Использование полученной регрессии для прогноза проблематично. Значение невязки составляет 6–59 ppb при сравнении ожидаемых по регрессии значений наземных концентраций метана по спутниковым измерениям на барических уровнях 400–500 гПа с измеренными на стационаре Тикси. Значения невязки наименьшие для весеннего сезона.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов О.А., Кокорев В.А. Сравнительный анализ наземных, морских и спутниковых измерений метана в нижней атмосфере российской части Арктики в условиях изменения климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 1–14.
- Белан Б.Д., Креков Г.М. Влияние антропогенного фактора на содержание парниковых газов в тропосфере. 1. Метан // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 4. С. 361–373.
- Елисеев А.В. Глобальный цикл метана: обзор // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 1. С. 52–70.



**Рис. 9.** Регрессионное соотношение между наземными измерениями и спутниковыми на барическом уровне 400–500 гПа для п. Тикси.

Стародубцев В.С. Исследование вариаций концентрации метана и углекислого газа в Арктической зоне // Вестник СВФУ. 2018. № 3(65). С. 80–88.

Юрганов Л.Н., Лейфер А., Майр К. Лунд. Сезонная и межгодовая изменчивость атмосферного метана над морями Северного Ледовитого океана по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 107–119.

Cicerone R.J., Oremland R.S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane // Glob. Biogeochem. Cycles. 1988. V. 2. № 4. P. 299–327.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report: Climate Change // Cambridge University Press. 1995. P. 21–23.

Ivakhov V. (MGO), Paramonova N. (MGO). Atmospheric CH<sub>4</sub> at Teriberka by Voeikov Main Geophysical Observatory, dataset published as CH<sub>4</sub>\_TER\_surface-flask\_MGO\_data1 at WDCGG, ver. 2021-10-17-2320.

(Reference date\*: 2022/01/05).

[https://doi.org/10.50849/WDCGG\\_0046-6003-1002-01-02-9999](https://doi.org/10.50849/WDCGG_0046-6003-1002-01-02-9999)

Xiong X., Barnet C., Maddy E., Sweeney C., Liu X., Zhou L., Goldberg M. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // J. Geophysical Research. 2008. V. 113.

## Correlation of Ground-Based and Satellite Measurements of Methane Concentration in the Surface Layer of The Atmosphere in the Tiksi Region

N. V. Rodionova

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

The correlation of AIRS/AQUA satellite measurements of methane concentration in the surface layer of the atmosphere with ground-based measurements at the A.I. Voeikov MGO station in Tiksi in 2011–2020 was determined. The correlation of satellite measurements with ground measurements depends on the season. In summer, the correlation is greatest, and it is the least in winter. For the winter period (December, January, February), the decrease in correlation is associated with possible inversions of air temperature (Yurganov et al., 2016; Anisimov, Kokorev, 2015). When the temperature contrast (TC) is less than 10°C (temperature difference between the surface and altitude of 4 km (600 hPa)), it is recommended to use satellite data averaged at the levels of 400–500 hPa. This gives an increase in the Spearman correlation coefficient between ground and satellite measurements from 0.44 (1000 hPa) to 0.63 (400–500 hPa). However, the obtained regression ratio with a determination coefficient of 0.44 makes it problematic to use it for predicting ground-based data from satellite measurements in areas similar in climatic conditions to Tiksi.

**Keywords:** remote sensing, ground measurements, satellite measurements, methane concentration in the atmosphere, Spearman correlation coefficient

### REFERENCES

Anisimov O.A., Kokorev V.A. Sravnitel'nyj analiz nazemnyh, morskih i sputnikovyh izmerenij metana v nizhnej atmosfere rossijskoj chasti Arktiki v usloviyah izmeneniya klimata [Comparative analysis of terrestrial, marine and satellite measurements of methane in the lower atmosphere of the Russian Arctic under climate change] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2015. № 2. P. 1–14. (In Russian).

Belan B.D., Krekov G.M. Vliyanie antropogennogo faktora na sodержanie parnikovyh gazov v troposfere. 1. Metan [The influence of anthropogenic factors on the content of greenhouse gases in the troposphere. 1. Methane] // Optika atmosfery i okeana. 2012. V. 25. № 4. P. 361–373. (In Russian).

Cicerone R.J., Oremland R.S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane // Glob. Biogeochem. Cycles. 1988. V. 2. № 4. P. 299–327.

Eliseev A.V. Global'nyj cikl metana: obzor [Global methane cycle: an overview] // Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya. 2018. V. 1. P. 52–70. (In Russian).

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report: Climate Change // Cambridge University Press. 1995. P. 21–23.

Ivakhov V. (MGO), Paramonova N. (MGO). Atmospheric CH<sub>4</sub> at Teriberka by Voeikov Main Geophysical Observatory, dataset published as CH<sub>4</sub>\_TER\_surface-flask\_MGO\_data1 at WDCGG, ver. 2021-10-17-2320.

[https://doi.org/10.50849/WDCGG\\_0046-6003-1002-01-02-9999](https://doi.org/10.50849/WDCGG_0046-6003-1002-01-02-9999) (Reference date\*: 2022/01/05).

Starodubcev V.S. Issledovanie variacij koncentracii metana i uglekislogo gaza v Arkticheskoj zone [Investigation of variations in the concentration of methane and carbon dioxide in the Arctic zone] // Vestnik SVFU. 2018. № 3(65). P. 80–88. (In Russian).

Xiong X., Barnet C., Maddy E., Sweeney C., Liu X., Zhou L., Goldberg M. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // J. Geophysical Research. 2008. V. 113.

Yurganov L.N., Lejfer A., Majr K. Lund. Sezonnaya i mezgodovaya izmenchivost' atmosfernogo metana nad moryami Severnogo Ledovitogo okeana po sputnikovym dannym [Seasonal and interannual variability of atmospheric methane over the seas of the Arctic Ocean according to satellite data] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2016. V. 13. № 2. P. 107–119. (In Russian).

---

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

---

---

**ОЦЕНКА ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНО-БОЛОТНЫХ  
УГОДИЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ, СУБАРКТИКИ  
И СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ ПО ДАННЫМ МИКРОВОЛНОВОГО  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**© 2022 г. А. Н. Романов<sup>а, \*</sup>, И. В. Хвостов<sup>а</sup>, В. В. Тихонов<sup>а, b</sup>, Е. А. Шарков<sup>b</sup><sup>а</sup>Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия<sup>b</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

\*E-mail: romanov\_alt@mail.ru

Поступила в редакцию 19.06.2022 г.

На основе ежедневных данных спутникового микроволнового зондирования изучены специфические особенности микроволнового излучения болот и заболоченных территорий Западной Сибири. Методика исследований включала в себя анализ динамики радиоярких температур подстилающей поверхности на тестовых участках, полевые измерения физических параметров подстилающей поверхности, и лабораторные измерения диэлектрических характеристик природных сред (вода, почва, растительность). Вариации сезонной динамики радиояркой температуры в основном обусловлены разной скоростью сезонного промерзания верхнего заболоченного слоя подстилающей поверхности. Проанализированы многолетние тренды сезонной и годовой динамики радиояркой температуры подстилающей поверхности и оценены гидрологические изменения в Арктике и Субарктике. Полученные результаты открывают новые возможности в использовании пассивных спутниковых данных микроволнового диапазона для изучения происходящих в природе сезонных динамических процессов и прогнозирования опасных гидрологических явлений.

*Ключевые слова:* гидрологические изменения, водно-болотные угодья, Арктика, Субарктика, дистанционное микроволновое зондирование

DOI: 10.31857/S020596142204008X

**ВВЕДЕНИЕ**

Во всем мире болота и водно-болотные угодья оказывают значительное влияние на круговорот воды, секвестирование углерода и динамику климата. Среди различных типов ландшафтов болота являются наиболее уязвимыми. Чувствительность к текущим изменениям температуры и режима осадков, включая способность удерживать или выделять большие количества метана, имеет решающее значение для понимания их роли в глобальных климатических процессах.

Являясь одной из крупнейших в мире заболоченных территорий, Западно-Сибирская низменность характеризуется наличием многочисленных отдельных болот и систем болот, расположенных в трех природных зонах (тундровой, таежной и лесостепной). По разным оценкам, они занимают площадь  $(0.8–1.0) \times 10^6$  км<sup>2</sup>. Богатые запасы нефти, газа и торфа делают эту территорию ведущей в России по добыче топливно-энергетических ресурсов. В последние десятилетия на территории Западно-Сибирской низменности произошли гидрологические изменения разной интенсивности в результате изменения климата, с разнонаправленными процессами заболачивания или усыхания заболоченных земель,

а также аридизации. Особо следует отметить, что гидрологические изменения, способствующие возникновению опасных природных явлений, наблюдаются в арктической и субарктической зоне Западной Сибири. Они могут быть связаны с комплексным влиянием природных и антропогенных факторов, таких как сокращение площади многолетних льдов, интенсивное таяние ледников, уменьшение количества и общей площади термокарстовых озер, более раннее таяние и позднее промерзание тундры (Karlsson et al., 2015), а также сезонное перераспределение атмосферных осадков (Bring et al., 2013). Происходящие изменения активизируют процессы деградации вечной мерзлоты и тундровой растительности (Koven et al., 2013), интенсивно прогревают поверхность тундры в зонах дефляции, увеличивают скорость испарения, выбрасывают в атмосферу дополнительные количества водяного пара и метана, таким образом, усугубляя парниковый эффект (Bergamaschi et al., 2013).

Запуск искусственных спутников, оснащенных микроволновыми радиометрами, позволил получать ежесуточные данные независимо от метеорологических условий для изучения сезонной динамики гидрологических изменений в мире,

расчета многолетних трендов этих изменений и прогнозирования вероятности природных рисков и возникновения стихийных бедствий (Poussanidis, Chrysoulakis, 2017). Дистанционный микроволновый мониторинг гидрологических изменений возможен при тщательном изучении закономерностей и особенностей сезонной динамики радиоярких температур подстилающей поверхности и при обоснованном выборе объективных радиофизических критериев. Эти данные используются для дистанционного определения влажности почвы (McCulloch et al., 2012), температуры и солености воды (Santi et al., 2016), а также концентрации и скорости таяния морского льда (Tikhonov et al., 2015).

Для дистанционного мониторинга водно-болотных угодий широко используются спутниковые данные радаров с синтезированной апертурой (SAR), установленных на спутниках RADARSAT-1, RADARSAT-2 и других (Mirmazloumi et al., 2021). Способность микроволнового излучения проникать сквозь растительный слой позволяет обнаруживать подтопленные участки. Для оценки их параметров используются разновременные данные RADARSAT-2 и InSAR для классификации болот и оценки годовых и сезонных изменений, происходящих с ними. В ближайшие годы европейская спутниковая система Sentinel SAR и канадская спутниковая система RADARSAT Constellation Mission (RCM) обеспечат оперативное повторное обследование территории и стандартизацию режимов сбора данных, что позволит расширить оперативное использование данных SAR для дистанционного мониторинга водно-болотных угодий и обнаружения участков с открытой водой (Brisco et al., 2017).

Тем не менее, все еще существуют проблемы с применением SAR для картирования водно-болотных угодий в плане выбора надлежащих характеристик (угла падения, частоты и поляризации). Последние тенденции направлены на применение разновременных, многочастотных и многокурсовых SAR-изображений, отличающихся большей точностью классификации по сравнению с одноканальными конфигурациями. Расширяется использование платформ облачных вычислений (Google Earth Engine, NASA Earth Exchange, веб-сервисы Amazon), предназначенных для мониторинга водно-болотных угодий в глобальном масштабе. Такие платформы могут упростить анализ и управление огромными данными наблюдений за поверхностью Земли в национальном и региональном масштабах (Adeli et al., 2020; Olthof, Rainville, 2020).

В работе (Choudhury, 1991) рассмотрены физические принципы пассивного микроволнового дистанционного зондирования гидрологических параметров с использованием наземных, бортовых и космических микроволновых радиометров, работающих на разных частотах. Радиометриче-

ские данные могут быть использованы для оценки влажности почвы и биомассы растительности, а также для расчета площади водного зеркала при сезонном затоплении болот. Оценка гидрологических параметров на основе микроволновых данных подразумевает использование моделей, в которых коэффициент излучения связан с одной или несколькими физическими характеристиками подстилающей поверхности. Неоднозначность зависимости между излучательной способностью подстилающей поверхности и конкретным гидрологическим параметром приводит к неопределенности в оценке последней. Несмотря на это ограничение, ежедневные пассивные микроволновые наблюдения ценны для региональной и глобальной гидрологии.

Еще одна сложная проблема удаленного мониторинга водно-болотных угодий связана с экранирующим эффектом древесной растительности, что снижает точность радиометрических измерений при выявлении участков затопленных лесов и водно-болотных угодий с густой растительностью (Jensen et al., 2019).

В работе (Schroeder et al., 2015) описана методика глобального картографирования поверхностных вод с разрешением 25 км по ежедневным спутниковым данным активно-пассивного микроволнового дистанционного зондирования. Полученный продукт, известный как SWAMPs (Болота), демонстрирует зависимость коэффициента излучения подстилающей поверхности от участков открытой воды и водно-болотных угодий, включая экранирующую растительность. Для лесов или развитого растительного покрова точность обнаружения таких участков значительно ухудшается. Сезонные вариации площади водно-болотных угодий и их межгодовая изменчивость в северных широтах изучались на частотах 19 и 37 ГГц с помощью пассивного микроволнового радиометра SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager). По спутниковым данным, площадь водно-болотных угодий в Северной Америке (48–68° с.ш.) была максимальной в июле–сентябре, а в Северной Евразии – с июня по сентябрь. Представленный в работе (Mialon, 2005) микроволновый метод спутникового картографирования водно-болотных угодий позволил изучить многолетнюю сезонную динамику в зависимости от продолжительности снежного периода и водности снежного покрова.

В данном исследовании проведен сравнительный анализ сезонных и многолетних изменений водно-болотных угодий Российской Арктики и Субарктики на основе ежесуточных данных SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity). В качестве основных объектов исследования были выбраны полигоны (болота и заболоченные участки), расположенные на территории Западной Сибири в различных природных зонах (тундра, лесотундра, тайга).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Территория исследования.** Исследования проводились на севере Западной Сибири ( $60^\circ \text{N} - 73^\circ \text{N}$ ). В качестве полигонов выбраны участки поверхности, включающие болота северной тайги, а также болота и заболоченные территории Арктики и Субарктики.

**Алгоритм расчета.** Радиояркость температура подстилающей поверхности на горизонтальной ( $T_{BH}$ ) и вертикальной ( $T_{BV}$ ) поляризации может быть рассчитаны по формуле, имеющей для плоской слабошероховатой подстилающей поверхности (Ulaby et al., 1981) следующий вид:

$$T_{BHV} = \chi_{HV} T_{ef},$$

где  $\chi_{HV}$  и  $T_{ef}$  – коэффициент излучения и эффективная температура излучающего слоя подстилающей поверхности толщиной (скин-слой)  $L$ :

$$L = \lambda / (4\pi \sqrt{\epsilon} \text{tg} \delta),$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $|\epsilon| = \epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}$ ,  $\text{tg} \delta = \epsilon'' / \epsilon'$  – тангенс угла потерь;  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости (КДП)  $\epsilon$  излучающей среды (воды или почвы).

Значение  $\chi_{HV}$  рассчитывается из следующих выражений:

$$\chi_H = 1 - \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}},$$

$$\chi_V = 1 - \frac{\epsilon \cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\epsilon \cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}.$$

$T_{ef}$  рассчитывается как:

$$T_{ef} = T_0 + \int_0^\infty \frac{dT}{dz} \exp \left[ -\int_0^\infty \gamma(z') dz' \right] dz,$$

где  $T_0$  – температура поверхности;  $dT/dz$  – локальный градиент температуры, определяемый в результате полевых подспутниковых измерений на тестовых участках;  $\gamma(z)$  – линейный коэффициент поглощения при угле падения  $\theta$ , вычисляемый по формуле (Sharkov, 2003):

$$\gamma(z) = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon' - \sin^2 \theta}{2}} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon' - \sin^2 \theta} \right)^2} - 1 \right].$$

Радиояркость температура подстилающей поверхности, включающей в себя участки с разными радиоизлучательными характеристиками, может быть рассчитана на основе принципа суперпозиции по формуле:

$$T_{BHV} = \sum_{j=1}^n T_{BHV}^j S_j,$$

где  $T_{BHV}^j, S_j$  – радиояркость температура отдельного участка, а также его площадь (определенная, как доля от общей площади поверхности,

формирующей регистрируемое радиометром излучение). Радиояркость температура отдельного  $i$ -того участка может быть рассчитана по формуле:

$$T_{BHV}^i = \left( T_{BHV} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n T_{BHV}^j S_j \right) / S_i.$$

**Данные SMOS.** Для анализа гидрологических изменений использовались данные продукта L1C SMOS. Радиояркость температура на горизонтальной и вертикальной поляризации измеряется в диапазоне углов зондирования  $0 - 60^\circ$  микроволновым радиометром MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis) (Kerr et al., 2010). MIRAS принимает восходящее излучение на частоте 1.41 ГГц. Максимальный пространственный охват достигается при угле визирования  $\theta \sim 42.5^\circ$ , при этом поперечное пространственное разрешение составляет 35 км, продольное – 65 км (Gutierrez et al., 2014). Данные L1C поставляются привязанными географически к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4N9, линейный размер ячейки которой составляет 16 км, а площадь – около 195 км<sup>2</sup> (Sahr et al., 2003). Таким образом, значение радиояркость температура для любой ячейки продукта L1C формируется участком подстилающей поверхности площадью 1760 км<sup>2</sup> (по уровню 3 дБ). Сама же ячейка площадью 195 км<sup>2</sup> расположена в центре этого участка (Sahr et al., 2003). Для достижения максимальной достоверности, из анализа были исключены следующие измерения:

- 1) значения, обремененные влиянием радиочастотных помех (по флагу качества RFI1);
- 2) значения, полученные за пределами региона Alias Free, свободного от перекрывающихся реплик изображений (по флагу качества AF);
- 3) данные с погрешностью определения  $T_{BH}$  и  $T_{BV}$  более 5 К;
- 4) данные с коэффициентом поляризации ( $T_{BH}/T_{BV}$ ) вне диапазона от 0.01 до 0.99.

Пространственное распределение  $T_{BH}$  и  $T_{BV}$  сравнивалось со спутниковыми снимками MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), полученными для той же территории (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>).

**Данные полевых и лабораторных измерений.** В наземном эксперименте были отобраны пробы верхних мерзлых слоев участков болот и тундры, затем проведены лабораторные измерения диэлектрических параметров грунтов и растительности с дальнейшим установлением эмпирических зависимостей радиояркость температура и коэффициента излучения от объемной влажности  $W$  и температуры  $T$ :  $T_{BH}(W)$ ,  $\chi_H(W)$  и  $T_{BH}(T)$ ,  $\chi_H(T)$ .

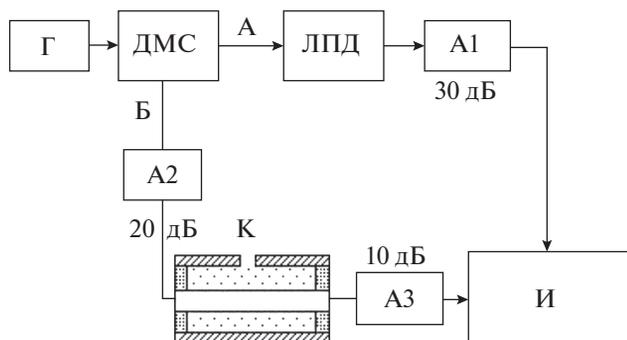


Рис. 1. Блок-схема лабораторной установки мостового типа на основе измерителя фаз ФК2-18.

Измерения диэлектрических свойств образцов проводились при температурах от 265 К до 295 К на частоте 1.41 ГГц на лабораторной установке мостового типа с использованием прибора для измерения разности фаз и амплитуд ФК2-18. Блок-схема установки представлена на рис. 1. Лабораторная установка мостового типа состояла из следующих основных элементов: Г – высокочастотный генератор сигналов Г4–78 (1.16–1.78 ГГц); ДМС – делитель мощности согласованный; ЛПД – линия переменной длины; А1, А2 и А3 – согласующие коаксиальные аттенюаторы; И – измерительный блок ФК2-18; К – коаксиальный контейнер для проб, выполненный в виде сегмента коаксиальной линии.

Установка имела следующие технические характеристики: диапазон однозначных измерений фазы  $\pm 180^\circ$ ; диапазон измерения затуханий от 0 до 60 дБ; погрешность измерений ослабления 0.2 дБ; погрешность измерения фазы  $0.2^\circ$ . Измерялись модуль и фаза комплексного коэффициента пропускания с последующим пересчетом в действительную и мнимую части КДП или коэффициента излучения. По результатам диэлектрических измерений рассчитывались значения скин-слоя Л и излучательная способность на горизонтальной поляризации при угле падения  $42.5^\circ$ . Значения скин-слоя для воды не превышали 0.1 см, тогда как для почвы (при увеличении объемной влажности в пределах  $0.06\text{--}0.26\text{ см}^3/\text{см}^3$ ) они уменьшались с 19 см до 7 см.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Основные закономерности.** Сезонная динамика радиояркостной температуры  $T_B(\text{JD})$  (JD – юлианский день, отсчитываемый с 01.01.2012) подстилающей поверхности водно-болотных угодий сильно различается в зависимости от их географического положения и природно-климатических зон. Излучательные характеристики подстилающей поверхности зависят от:

- почвенной влажности, засоленности и температуры (для почвенного покрова);
- температуры и солености воды (для водной поверхности);
- биомассы и фенологии растительности (для растительного покрова);
- температуры, биомассы, фенологии и соотношения живой (например, мох) и мертвой (торф) растительности (для болотной растительности).

При отрицательных температурах на поверхности почвы появляется сезонно-мерзлый слой, а на поверхности воды – ледяной покров. В этом случае коэффициент излучения водно-болотных угодий находится в пределах соотношения толщины мерзлого слоя и скин-слоя в зависимости от характеристик различных слоев.

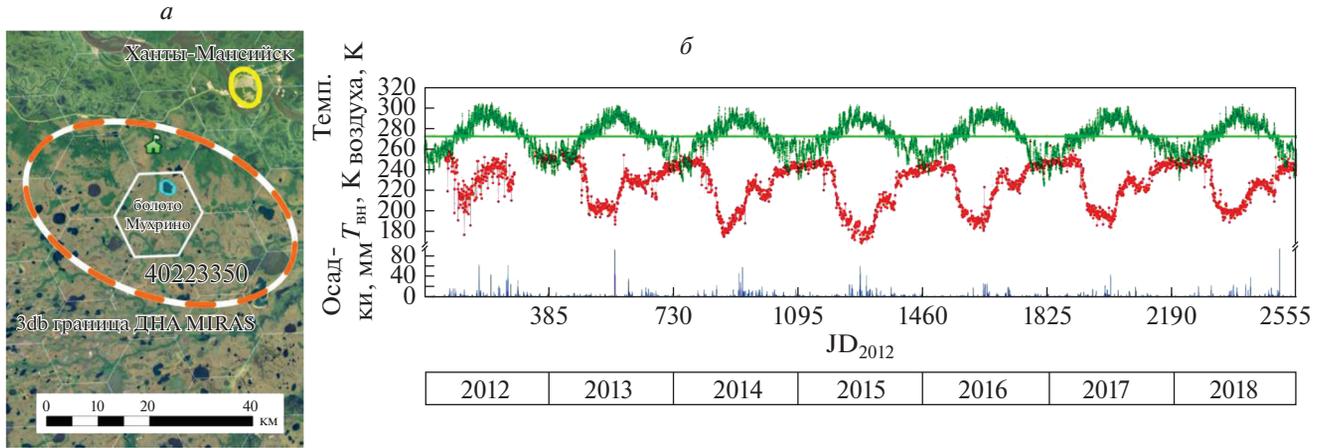
**Водно-болотные угодья тайги** Сезонная динамика болот Западной Сибири, расположенных в умеренной зоне, зависит не только от типа подстилающей поверхности (болота, растительный покров, торфяники), но и от интенсивности сезонного промерзания болотной толщи, скорости образования и нарастания льда на поверхности. Карта-схема исследуемой территории представлена на рис. 2, а.

На рис. 2, б представлена многолетняя сезонная динамика  $T_B(\text{JD})$  для заболоченного тестового участка северной тайги в Ханты-Мансийском автономном округе (ячейка DGG ID 4023350). Значения  $T_B(\text{JD})$  зависят от вида надводной и подводной болотной растительности, ее биомассы и фенологических процессов, связанных с ростом и увяданием растительного покрова, в том числе сезонных процессов усыхания/обводнения территории.

На рис. 3 представлены фотографии поверхности (а) и мерзлого верхнего слоя (б) болота зимой. На рис. 3, в представлена зависимость  $T_{BH}(T)$ , полученная в результате лабораторных измерений диэлектрических характеристик образцов почвы, отобранных с поверхности болота. Из графика видно, что таяние льда и появление в образце жидкой воды при температуре 273 К резко меняют зависимость, так как диэлектрические характеристики льда и воды сильно различаются. Зависимость  $T_{BH}(T)$ , полученная из диэлектрических измерений верхнего мерзлого слоя, состоящего из болотной растительности, имеет вид:

$$T_{BH} = \begin{cases} 25093.4742 + 188.34915T - 0.35024T^2, \\ \sigma = 1.15, & 265 \leq T \leq 273, \\ 722041.375 - 5235.82155T + 9.49369T^2, \\ \sigma = 2.51, & 273 \leq T \leq 275, \end{cases}$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическая ошибка.



**Рис. 2.** Карта-схема исследуемой территории с геодезическими ячейками сетки ISEA и областью, формирующей регистрируемое радиометром MIRAS излучение (а). Многолетняя динамика радиояростной температуры участка в северной тайге – ячейка 4023350 (б).

### Водно-болотные угодья Арктики и Субарктики.

Сезонная динамика  $T_{BH}(T)$  водно-болотных угодий, расположенных в арктической и субарктической зонах, исследована на примере тестовых участков в Ямало-Ненецком автономном округе. На рис. 4а представлена схематическая карта, на которой обозначены ячейки геодезической сетки DGG ISEA 4N9, расположенные в границах выбранных тестовых участков. На рис. 4, б–в изображены пространственные распределения радиояростной температуры поверхности по данным SMOS (продукт L1C) за январь и май. Низкие (менее 175 K) значения радиояростной температуры соответствуют открытой воде или заболоченным участкам. Анализ спутниковых данных показал, что значительные территории полуостровов Ямал и Гыданский (Ямало-Ненецкий автономный округ) были сильно затоплены весной из-за интенсивного снеготаяния. На рис. 5, а–е представлены зависимости  $T_{BH}(JD)$  для тестовых участков, отмеченных на рис. 4, а.

На рис. 6, а–в представлены фотографии тундры, тундровой растительности и почв под тундровой растительностью.

На рис. 7, а–б представлены зависимости коэффициента излучения почвы тундры (Гыданский п-ов) от температуры и объемной влажности. Обратная зависимость  $W(\chi)$ , аппроксимируемая квадратичным полиномом и пригодная для интерпретации спутниковых данных, имеет вид:

$$W = 1.41 - 2.45\chi + 1.044\chi^2, \quad \sigma = 0.037.$$

### ОБСУЖДЕНИЕ

На примере болота Мухрино (Ханты-Мансийский автономный округ), в сезонной динамике радиояростной температуры можно выделить

следующие пять периодов, характерных для болот и водно-болотных угодий северной тайги (рис. 8):

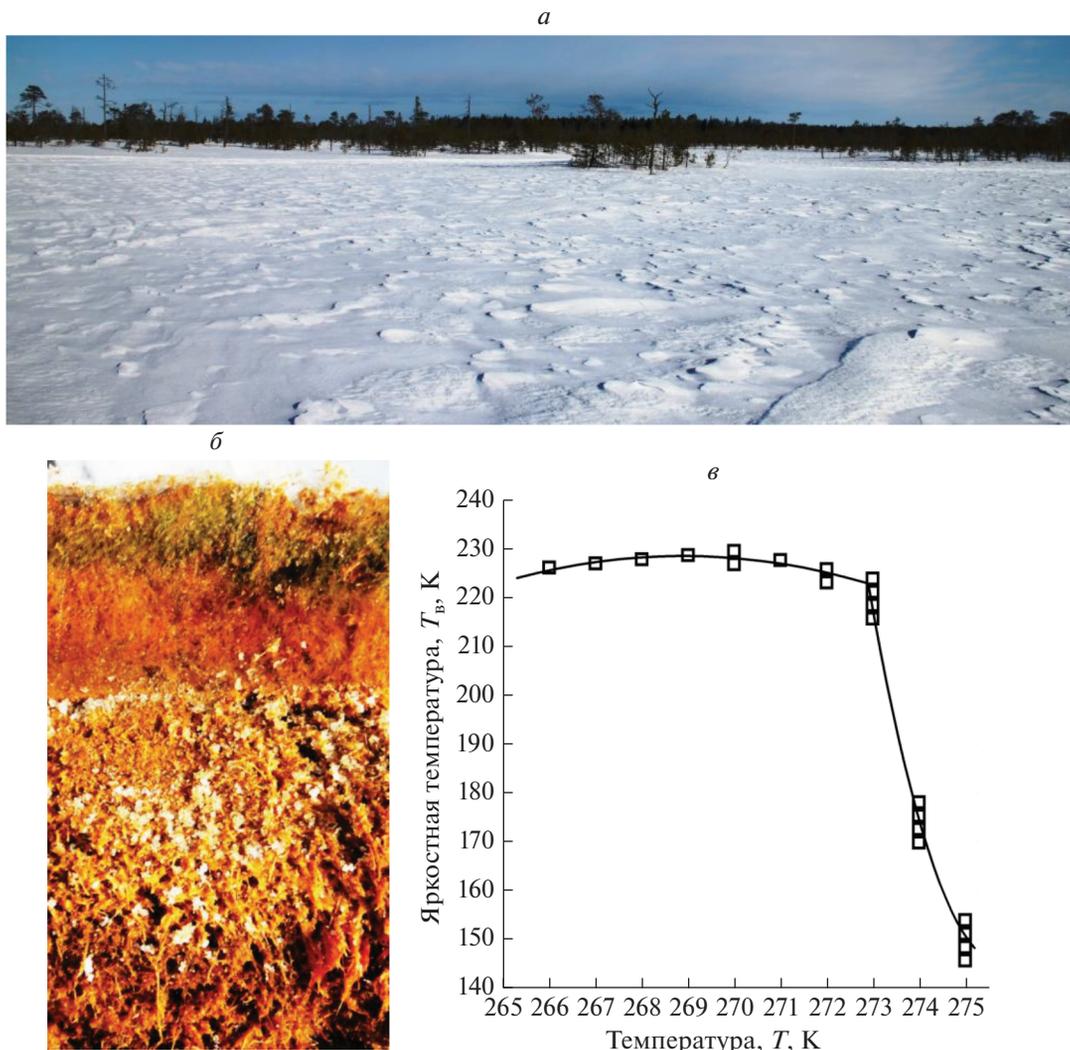
1) 1–2 “Зимнее плато” – период, длящийся примерно с начала ноября по конец марта, в течение которого значения  $T_{BH} = 255$  K постоянные (в пределах доверительных интервалов) или имеют слабо выраженный положительный тренд.

2) 2–3 “Весеннее таяние” – быстрое (10–30 дней) уменьшение значений  $T_{BH}(JD)$  до 220 K, вызванное, вероятно, покрытием водой значительной части подстилающей поверхности в результате таяния сезонного снежного покрова. Как правило, минимальные значения наблюдаются в течение не более чем 2–5 дней, т.е. отрицательная динамика быстро сменяется положительной, рост происходит чуть медленнее и не во всех случаях монотонно.

3) 3–4 “Летний период 1: – в разные годы наблюдается разная динамика  $T_{BH}(JD)$ , вид которой зависит от вегетационных циклов болотной растительности. В точке 4 достигается максимальное значение  $T_{BH}$ , что может соответствовать максимальному высыханию заболоченной территории или максимальному развитию болотной растительности и экранированию ею излучения водной поверхности.

4) 4–5 “Летний период 2” – связан с постепенным увяданием надводной растительности.

5) 5–1 “Осенне-зимнее промерзание” болотной толщи. Вид сезонной динамики  $T_{BH}(JD)$  зависит от особенностей промерзания болотной толщи как многослойной системы, состоящей из слоев живой растительности, отмершей растительности и почвы. Кроме этого,  $T_{BH}(JD)$  зависит от диэлектрических характеристик болотной растительности разного типа (живой и отмершей)



**Рис. 3.** Фотография поверхности болота зимой (*a*), разрез его верхнего мерзлого слоя (*b*), и установленная по диэлектрическим измерениям зависимость  $T_{BH}(T)$  для этого верхнего слоя (*в*).

при различных сочетаниях температуры и влажности.

В качестве дистанционных радиофизических критериев, характеризующих современные гидрологические изменения водно-болотных угодий, можно использовать продолжительности периодов:

- 1) болотная толща;
- 2) образование сезонно-мерзлого слоя (до толщины скин-слоя);
- 3) установившийся сезонно-мерзлый слой толщиной больше величины скин-слоя.

Анализ многолетних трендов продолжительности последнего периода позволит выявить вектор региональных климатических изменений.

Сезонная динамика  $T_{BH}(JD)$  на тестовых участках *б*, *в*, *г* и *д* (рис. 5) аналогична, в отличие от участка, расположенного значительно южнее (*5a*). Таким образом, водно-болотные угодья

Арктики и Субарктики в разных широтах неодинаковы. Это может быть связано с различной продолжительностью холодных и теплых периодов в зависимости от географических широт, а также с различной скоростью промерзания и оттаивания верхнего слоя подстилающей поверхности (переувлажненной почвы и открытой воды). В отличие от более южных территорий, районы, расположенные за Полярным кругом, характеризуются наличием вечной мерзлоты. Анализ  $T_{BH}(JD)$  для исследуемых участков позволил достоверно определить продолжительность холодных периодов для разных лет с точностью до суток. Продолжительность холодных периодов для изучаемых полигонов определяли по многолетней сезонной динамике  $T_{BH}(JD)$  (см. рис. 9).

На рис. 9 заметны значительные годовые колебания длительности холодного периода.

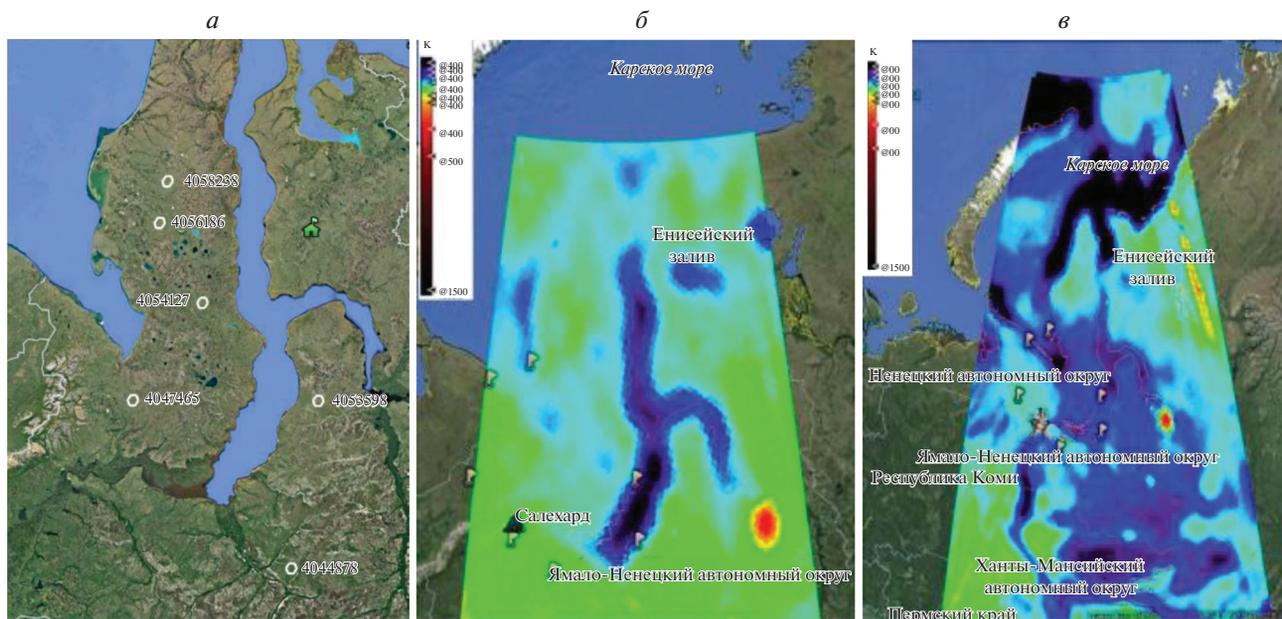


Рис. 4. Карта-схема Ямало-Ненецкого автономного округа с тестовыми ячейками (а) и значения радиояркостной температуры по данным SMOS в январе (б) и в мае (в).

Для тундры, как многослойной системы с сезонно-талым верхним слоем, были выделены характерные периоды в сезонной динамике  $T_{вн}(JD)$  подстилающей поверхности, связанные с сезонным промерзанием верхнего слоя:

- 1) “зимняя” тундра, без сезонно-талого слоя (холодный период);
- 2) сезонное оттаивание верхнего слоя многолетнемерзлой почвы;
- 3) “летняя” тундра, с сезонно-талым слоем почвы (теплый период);
- 4) промерзание верхнего сезонно-талого слоя до вечной мерзлоты.

Продолжительность холодного периода в зависимости от физических характеристик подстилающей поверхности и метеорологических условий может служить дистанционным радиофизическим критерием. Многолетние тренды продолжительности холодного периода могут быть использованы для оценки гидрологических и региональных климатических изменений.

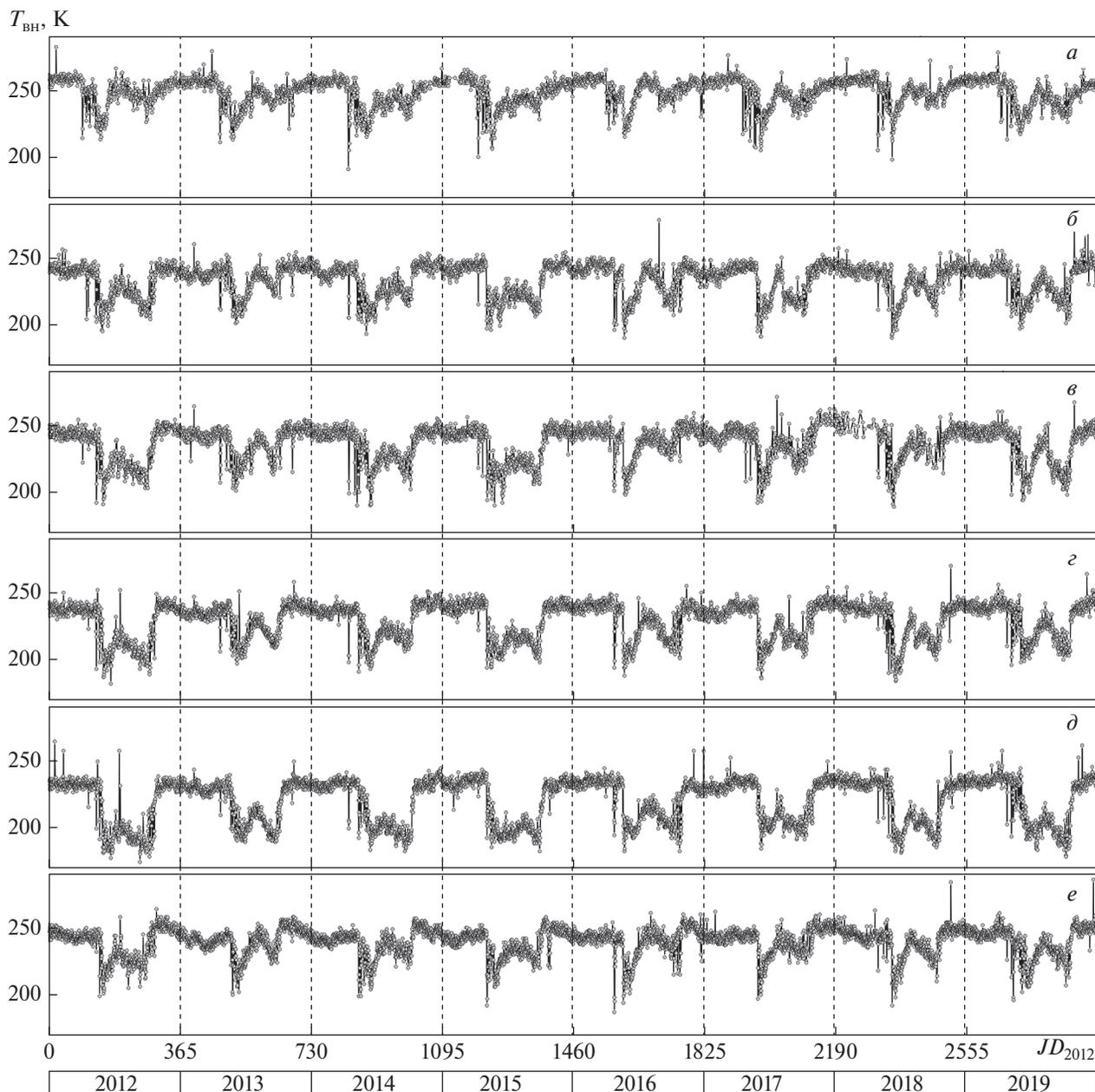
Для дистанционной оценки пространственного распределения влажности почвы Гыданского полуострова использованы данные спутникового зондирования, результаты наземных и лабораторных измерений. На рис. 10 представлена схематическая карта влагосодержания на Гыданском полуострове по результатам спутниковых, натуральных и лабораторных измерений. Заболоченные и обводненные участки тундры расположены в непосредственной близости от прибрежной зоны эстуариев рек Обь и Таз.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные указывают на некоторые специфические особенности сезонной динамики яркостных температур водно-болотных угодий, которые существенно отличаются от таковых для акваторий морей, пресноводных озер и сезонно-мерзлых почв степной зоны (Тихонов и др., 2021; Tikhonov et al., 2018; Boyarskii et al., 2019). Такие различия связаны со спецификой промерзания болотной толщи, представляющей собой сложную многоярусную многокомпонентную систему, состоящую из живой и отмершей болотной растительности, находящихся в условиях переувлажнения. На основе анализа данных SMOS, наряду с наземными и лабораторными измерениями, выявлены сезонные и многолетние колебания коэффициента излучения водно-болотных угодий, обусловленные гидрологическими и климатическими изменениями.

Предлагаемый методологический подход к дистанционному региональному мониторингу водно-болотных угодий может быть использован для решения актуальных задач, стоящих в настоящее время перед мировым научным сообществом:

- 1) прогноз изменений геохимического цикла углерода, происходящих под действием природных (климатических) и антропогенных факторов;
- 2) оценка региональных запасов пресной воды;
- 3) изучение процессов влагообмена между атмосферой и подстилающей поверхностью;
- 4) оценка влияния процессов высыхания/обводнения болот и процессов замерзания/оттаивания (в условиях умеренного, арктического и суб-



**Рис. 5.** Многолетние зависимости радиояростной температуры  $T_{BH}(JD)$  для обозначенных на рисунке 4а тестовых участков: 4044878 (а), 4047465 (б), 4053598 (в), 4054127 (г), 4056186 (д) и 4058238 (е).

арктического климата) на испарение с открытых водных пространств, а также эвапорацию и транспирацию влаги болотной растительностью;

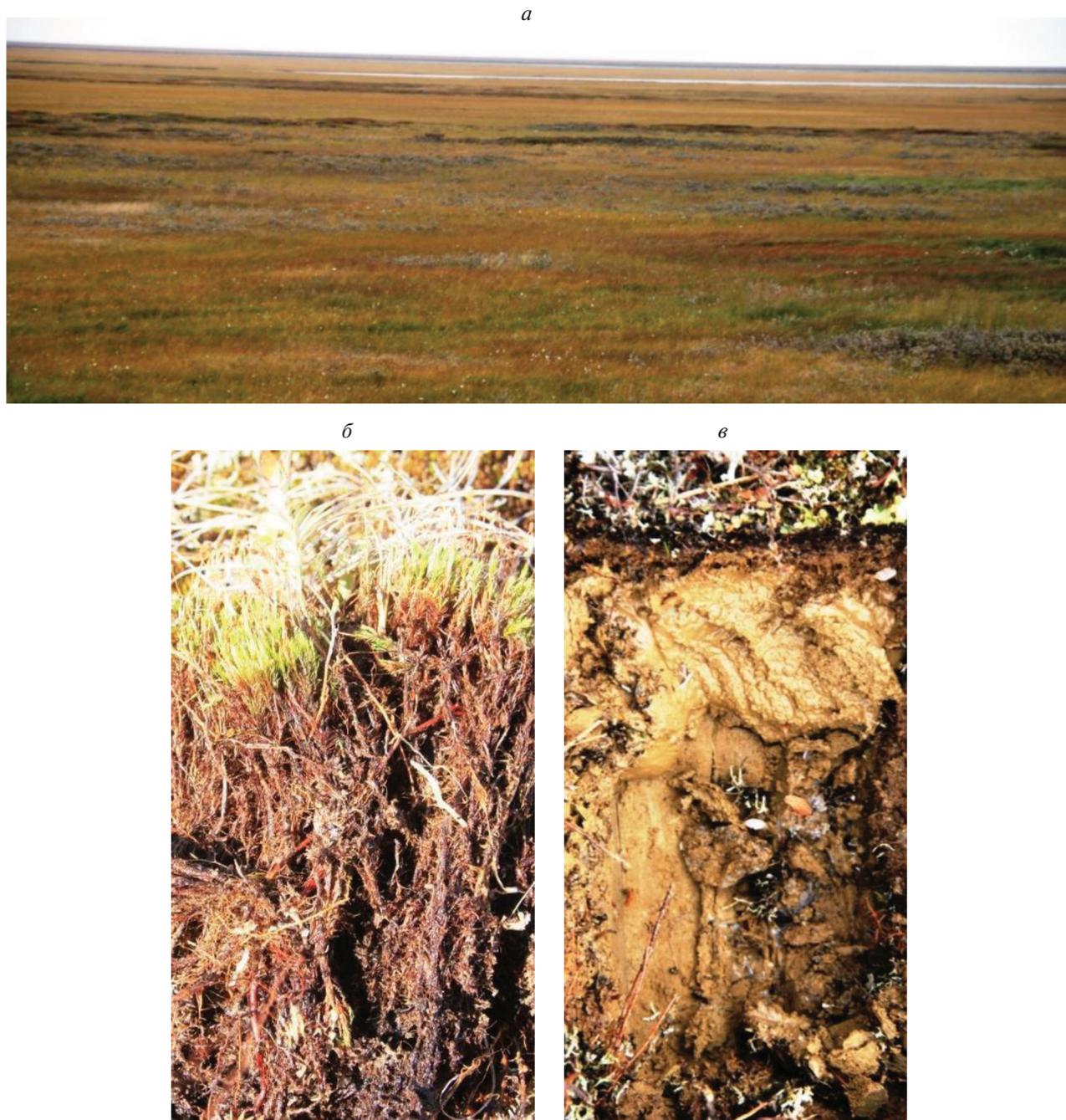
5) оценка аридизации территорий на основе изучения сезонной и многолетней динамики площадей, занятых водно-болотными угодьями по всему миру;

6) оценка площадей затопленных лесов.

Для расширения возможностей дистанционного мониторинга водно-болотных угодий с использованием спутниковых микроволновых ме-

тодов необходимо всесторонне изучить влияние травяно-древесного растительного покрова на излучательную способность водно-болотных угодий.

Для дистанционного мониторинга торфяников и оценки запасов торфа (ценного ископаемого топлива) необходимо изучение особенностей взаимодействия многослойной системы, состоящей из неизотермических слоев живой и отмершей болотной растительности. Точность метода позволяет повысить дистанционный мониторинг водно-болотных угодий за счет интеграции спут-



**Рис. 6.** Фотографии типичного пейзажа тундры весной (май), растительности тундры, и разреза почвы, находящейся под растительностью.

никовых данных в оптическом, инфракрасном и микроволновом диапазонах; использование радиолокационных и радиометрических систем наблюдения; наземные измерения физических параметров подстилающей поверхности на полигонах для оценки пространственных и временных характеристик водно-болотных угодий.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН, Института космических исследований РАН, в рамках государственной темы “Мониторинг” (Гос. рег. № 122042500031-8) и при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-05-00198-а).

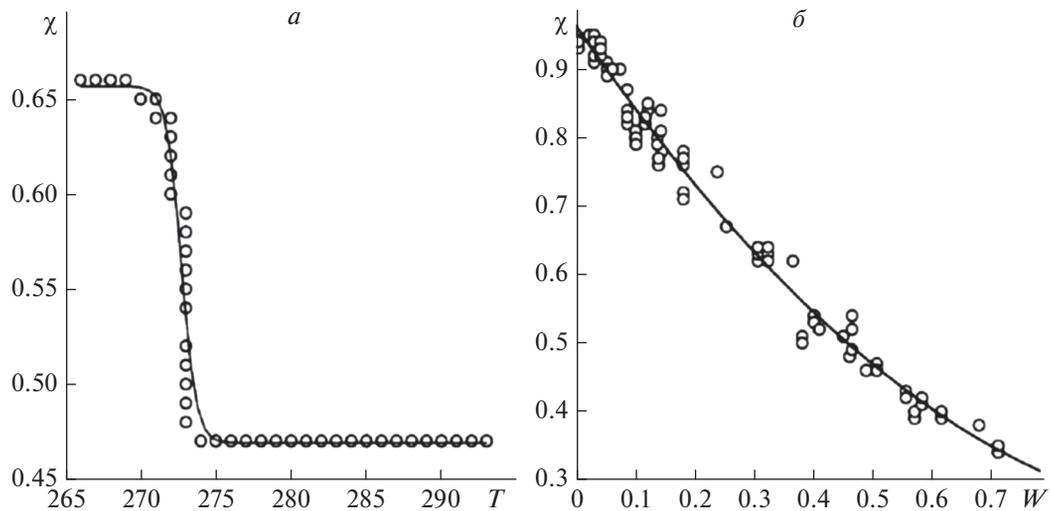


Рис. 7. Зависимости коэффициента излучения почвы от температуры (а) и от объемной влажности (б) для образца почвы с полуострова Гыданский.

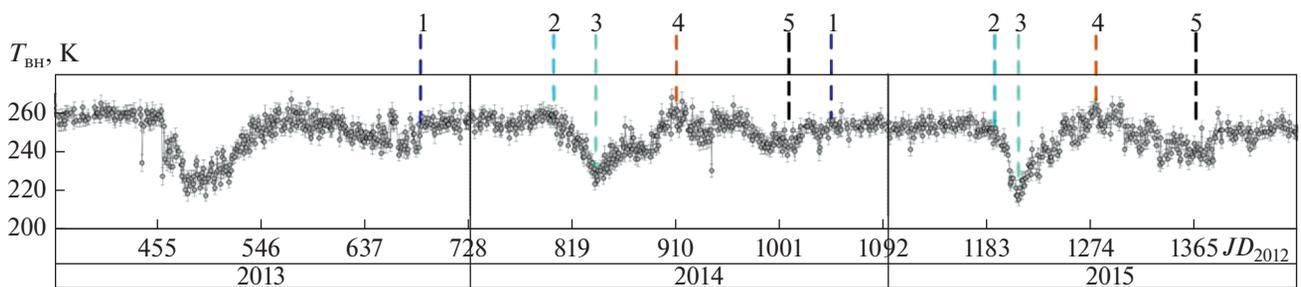


Рис. 8. Динамика радиояркостной температуры участка подстилающей поверхности, содержащего водно-болотные угодья.

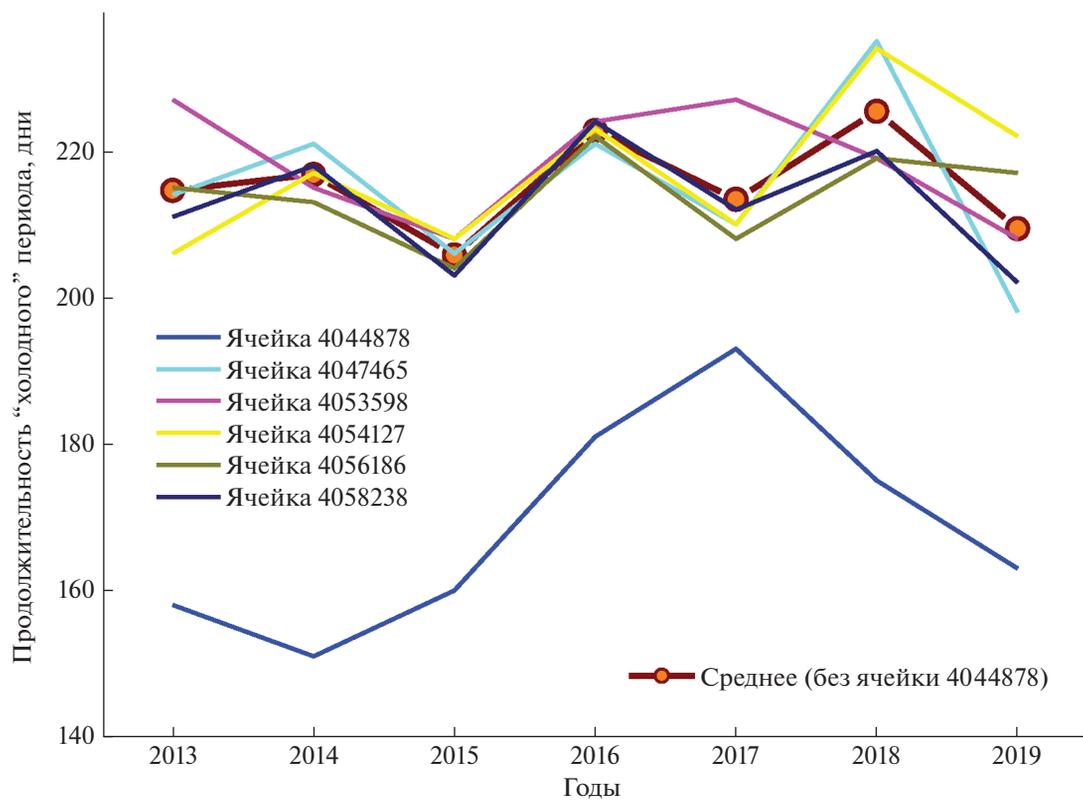
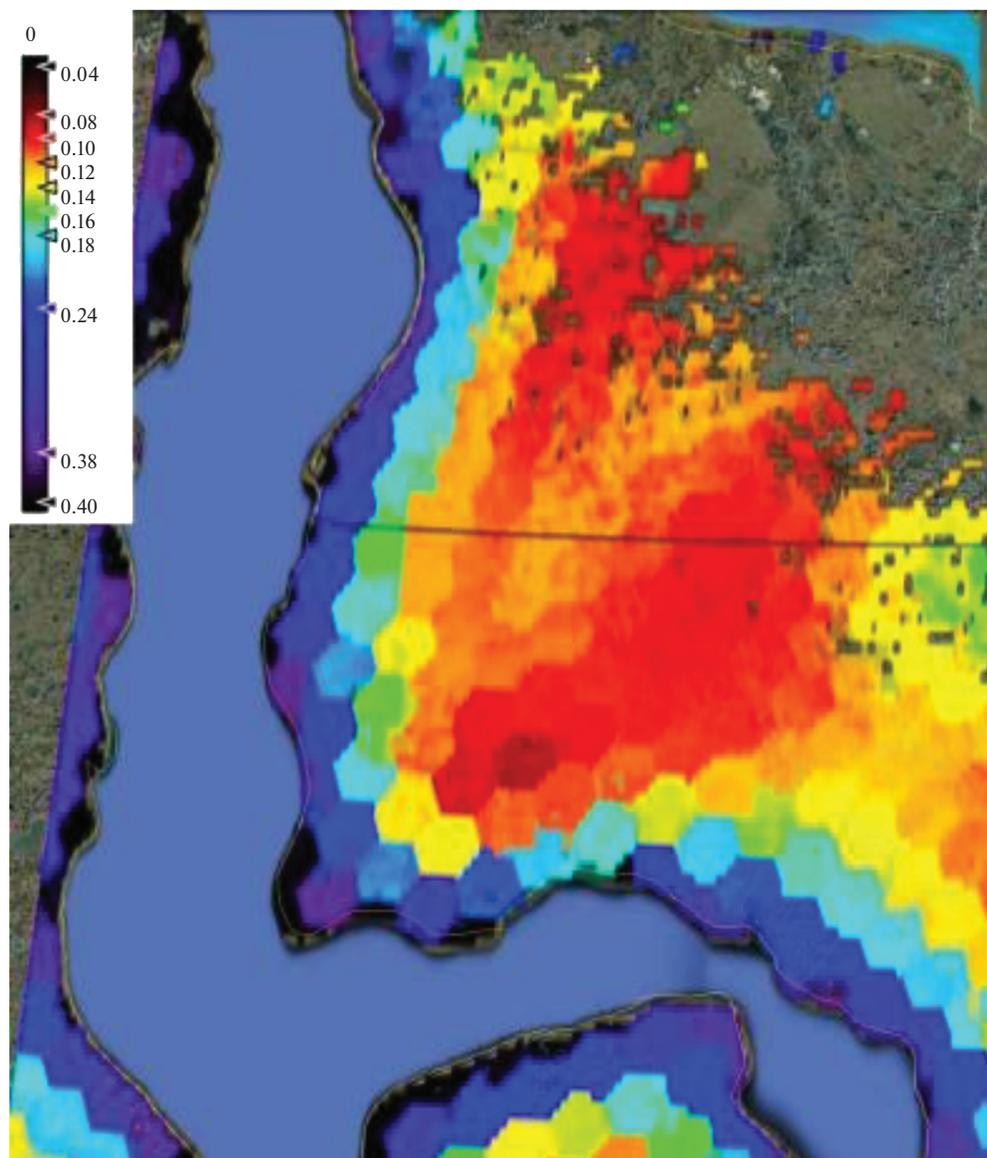


Рис. 9. Межгодовые тренды продолжительности холодного периода для обозначенных на рис. 4а тестовых ячеек.



**Рис. 10.** Карта-схема объемной влажности верхнего слоя почвы на Гыданском полуострове по результатам спутниковых, натуральных и лабораторных измерений.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне благодарят профессора Елену Лапшину и доцента Евгения Зарова за их содействие при исследовании болота Мухрино.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Тихонов В.В., Хвостов И.В., Романов А.Н., Алексеева Т.А., Синицкий А.И., Тихонова М.В., Шарков Е.А., Комарова Н.Ю. Межгодовые вариации собственного микроволнового излучения Обской губы в период ледостава и их связь с гидрологическими и климатическими изменениями региона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 185–199. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-6-185-199>

Adeli S., Salehi B., Mahdianpari M., Quackenbush L.J., Brisco B., Tamiminia H., Shaw S. Wetland Monitoring Using SAR Data: A Meta-Analysis and Comprehensive Review // Remote Sens. 2020. V. 12. P. 2190. <https://doi.org/10.3390/rs12142190>

Bergamaschi P., Houweling S., Segers A. et al. Atmospheric CH<sub>4</sub> in the first decade of the 21st century: inverse modeling analysis using SCIAMACHY satellite retrievals and NOAA surface measurements // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. V. 118. P. 7350–7369.

Boyarskii D.A., Romanov A.N., Khvostov I.V., Tikhonov V.V., Sharkov E.A. On Evaluating the Depth of Soil Freezing Based on SMOS Satellite Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. V. 55. № 9. P. 996–1004. <https://doi.org/10.1134/S0001433819090147>

Brisco B., Ahern F., Murnaghan K., White L., Canisus F., Lancaster P. Seasonal Change in Wetland Coherence as an

- Aid to Wetland Monitoring // Remote sensing. 2017. V. 9. Is. 2. Article Number 158.  
<https://doi.org/10.3390/rs9020158>
- Bring A., Destouni G.* Hydro-climatic changes and their monitoring in the Arctic: Observation-model comparisons and prioritization options for monitoring development // *J. Hydrology*. 2013. V. 492. P. 273–280.
- Choudhury B.J.* Passive microwave remote-sensing contribution to hydrological variables // *Surveys in geophysics*. 1991. V. 12. Is. 1–3. P. 63–84.  
<https://doi.org/10.1007/BF01903412>
- Gutierrez A., Castro R., Vieira P.* SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. SO-DS-DME-L1OP-0009. No. 2.14. 2014. 80 p. available at: [https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS\\_L1c-Data-Processing-Models](https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS_L1c-Data-Processing-Models).
- Jensen K., McDonald K.* Surface Water Microwave Product Series Version 3: A Near-Real Time and 25-Year Historical Global Inundated Area Fraction Time Series from Active and Passive Microwave Remote Sensing // *IEEE Geoscience and remote sensing letters*. 2019. V. 16. P. 1402–1406.  
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2898779>
- Karlsson J.M., Jaramillo F., Destouni G.* Hydro-climatic and lake change patterns in Arctic permafrost and non-permafrost areas // *J. Hydrology*. 2015. V. 529. P. 134–145.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.005>
- Kerr Y. H., Waldteufel P., Wigneron J.P. et al.* The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // *Proceedings of IEEE* 2010. V. 98. P. 666–687.  
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043032>
- Koven C.D., Riley W.J., Stern A.* Analysis of permafrost thermal dynamics and response to climate change in the CMIP5 Earth system models // *J. Clim.* 2013. V. 26. P. 1877–1900.
- McCulloch M.E., Spurgeon P., Chuprin A.* Have mid-latitude ocean rain-lenses been seen by the SMOS satellite? // *Ocean Modelling*. 2012. V. 43–44. P. 108–111.  
<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.12.005>
- Mialon A.* Wetland seasonal dynamics and interannual variability over northern high latitudes, derived from microwave satellite data // *J. geophysical research*. 2005. V. 110. P. 17102.  
<https://doi.org/10.1029/2004JD005697>
- Microwave Remote Sensing-Active and Passive. By *F.T. Ulaby, R.K. Moore and A.K. Fung*. (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1981 and 1982). Volume I: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry. P. 473.
- Mirmazloumi S.M., Moghimi A., Ranjgar B., Mohseni F., Ghorbanian A., Ahmadi S.A., Amani M., Brisco B.* Status and Trends of Wetland Studies in Canada Using Remote Sensing Technology with a Focus on Wetland Classification: A Bibliographic Analysis // *Remote Sens.* 2021. V. 13. P. 4025.  
<https://doi.org/10.3390/rs13204025>
- Olthof I., Rainville T.* Evaluating Simulated RADARSAT Constellation Mission (RCM) Compact Polarimetry for Open-Water and Flooded-Vegetation Wetland Mapping // *Remote Sens.* 2020. V. 12. P. 1476.  
<https://doi.org/10.3390/rs12091476>
- Poursanidis D., Chrysoulakis N.* Remote Sensing, natural hazards and the contribution of ESA Sentinels Missions // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2017. V. 6. P. 25–38.  
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.02.001>
- Santi E., Paloscia S., Pettinato S., Fontanelli G.* Application of artificial neural networks for the soil moisture retrieval from active and passive microwave spaceborne sensors // *International J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2016. V. 48. P. 61–73.  
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.08.002>
- Sahr K., White D., Kimerling A.J.* Geodesic Discrete Global Grid Systems // *Cartography and Geographic Information Science*. 2003. V. 30. Is. 2. P. 121–134.
- Schroeder R., McDonald K.C., Chapman B.D., Jensen K., Podest E., Tessler Z.D., Bohn T.J., Zimmermann R.* Development and Evaluation of a Multi-Year Fractional Surface Water Data Set Derived from Active/Passive Microwave Remote Sensing Data // *Remote Sens.* 2015. V. 7. P. 16688–16732.  
<https://doi.org/10.3390/rs71215843>
- Sharkov E.A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations, ser. Springer Praxis Books in Geophysical Sciences. Berlin, Germany: Springer-Verlag. 2003.
- Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Ivanov V.V., Boyarskii D.A., Alexeeva T.A., Komarova N.Y.* A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data // *Advances in Space Research*. 2015. V. 56. P. 1578.
- Tikhonov V., Khvostov I., Romanov A., Sharkov E.* Theoretical study of ice cover phenology at large freshwater lakes based on SMOS MIRAS data // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. № 8. P. 2727–2740.  
<https://doi.org/10.5194/tc-12-2727-2018>

## Assessment of Hydrological Changes in Wetlanded Areas of the Arctic and Subarctic According to Remote Microwave Sensing Data

A. N. Romanov<sup>1</sup>, I. V. Khvostov<sup>1</sup>, V. V. Tikhonov<sup>1, 2</sup>, and E. A. Sharkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia*

<sup>2</sup>*Space Research Institute RAS, Moscow, Russia*

On the basis of daily data of satellite microwave sounding, the specific features of microwave radiation of swamps and wetlands of Western Siberia, under conditions of changing seasons, have been studied. The research technique included the analysis of the radio brightness temperatures of the underlying surface of the test sites, measured from the SMOS satellite; field measurements of physical parameters of the underlying surface; laboratory measurements of dielectric characteristics of natural media. It is shown that the main reasons for the differences in the seasonal dynamics of radio brightness temperatures are: 1) different rates of seasonal freezing of the upper waterlogged layer of the underlying surface; 2) the difference in dielectric characteristics of water-containing natural media (water body, soil, vegetation). The analysis of long-term trends in

the seasonal and annual dynamics of the radio brightness temperatures of the underlying surface is carried out and, on their basis, the hydrological changes in the Arctic and Subarctic are estimated. The results obtained open up new possibilities for using satellite data in the microwave range to study seasonal dynamic processes occurring in nature and predict hazardous hydrological phenomena.

*Keywords:* hydrological changes, wetlands, Arctic, Subarctic, microwave remote sensing

## REFERENCES

- Adeli S., Salehi B., Mahdianpari M., Quackenbush L.J., Brisco B., Tamiminia H., Shaw S.* Wetland Monitoring Using SAR Data: A Meta-Analysis and Comprehensive Review // *Remote Sens.* 2020. V. 12. P. 2190. <https://doi.org/10.3390/rs12142190>
- Bergamaschi P., Houweling S., Segers A. et al.* Atmospheric CH<sub>4</sub> in the first decade of the 21st century: inverse modeling analysis using SCIAMACHY satellite retrievals and NOAA surface measurements // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118. P. 7350–7369.
- Boyarskii D.A., Romanov A.N., Khvostov I.V., Tikhonov V.V., Sharkov E.A.* On Evaluating the Depth of Soil Freezing Based on SMOS Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2019. V. 55. № 9. P. 996–1004. <https://doi.org/10.1134/S0001433819090147>
- Brisco B., Ahern F., Murnaghan K., White L., Canisus F., Lancaster P.* Seasonal Change in Wetland Coherence as an Aid to Wetland Monitoring // *Remote sensing.* 2017. V. 9. Is. 2. Article Number 158. <https://doi.org/10.3390/rs9020158>
- Bring A., Destouni G.* Hydro-climatic changes and their monitoring in the Arctic: Observation-model comparisons and prioritization options for monitoring development // *J. Hydrology.* 2013. V. 492. P. 273–280.
- Choudhury B.J.* Passive microwave remote-sensing contribution to hydrological variables // *Surveys in geophysics.* 1991. V. 12. Is. 1–3. P. 63–84. doi 10.1007/BF01903412
- Gutierrez A., Castro R., Vieira P.* SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. SO-DS-DME-L1OP-0009. No. 2.14. 2014. 80 p. available at: [https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS\\_L1c-Data-Processing-Models](https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS_L1c-Data-Processing-Models)
- Jensen K., McDonald K.* Surface Water Microwave Product Series Version 3: A Near-Real Time and 25-Year Historical Global Inundated Area Fraction Time Series from Active and Passive Microwave Remote Sensing // *IEEE Geoscience and remote sensing letters.* 2019. V. 16. P. 1402–1406. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2898779>
- Karlsson J.M., Jaramillo F., Destouni G.* Hydro-climatic and lake change patterns in Arctic permafrost and non-permafrost areas // *J. Hydrology.* 2015. V. 529. P. 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.005>
- Kerr Y. H., Waldteufel P., Wigneron J.P. et al.* The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // *Proceedings of IEEE* 2010. V. 98. P. 666–687. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043032>
- Koven C.D., Riley W.J., Stern A.* Analysis of permafrost thermal dynamics and response to climate change in the CMIP5 Earth system models // *J. Clim.* 2013. V. 26. P. 1877–1900.
- McCulloch M.E., Spurgeon P., Chuprin A.* Have mid-latitude ocean rain-lenses been seen by the SMOS satellite? // *Ocean Modelling.* 2012. V. 43–44. P. 108–111. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.12.005>
- Mialon A.* Wetland seasonal dynamics and interannual variability over northern high latitudes, derived from microwave satellite data // *J. geophysical research.* 2005. V. 110. P. 17102. doi 10.1029/2004JD005697
- Microwave Remote Sensing-Active and Passive. By *F.T. Ulaby. R.K. Moore and A.K. Fung.* (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1981 and 1982). Volume I: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry. P. 473.
- Mirmazloumi S.M., Moghimi A., Ranjgar B., Mohseni F., Ghorbanian A., Ahmadi S.A., Amani M., Brisco B.* Status and Trends of Wetland Studies in Canada Using Remote Sensing Technology with a Focus on Wetland Classification: A Bibliographic Analysis // *Remote Sens.* 2021. V. 13. P. 4025. doi 10.3390/rs13204025
- Olthof I., Rainville T.* Evaluating Simulated RADARSAT Constellation Mission (RCM) Compact Polarimetry for Open-Water and Flooded-Vegetation Wetland Mapping // *Remote Sens.* 2020. V. 12. P. 1476. doi 10.3390/rs12091476
- Poursanidis D., Chrysoulakis N.* Remote Sensing, natural hazards and the contribution of ESA Sentinels Missions // *Remote Sensing Applications: Society and Environment.* 2017. V. 6. P. 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.02.001>
- Santi E., Paloscia S., Pettinato S., Fontanelli G.* Application of artificial neural networks for the soil moisture retrieval from active and passive microwave spaceborne sensors // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2016. V. 48. P. 61–73. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.08.002>
- Sahr K., White D., Kimerling A.J.* Geodesic Discrete Global Grid Systems // *Cartography and Geographic Information Science.* 2003. V. 30. Is. 2. P. 121–134.
- Schroeder R., McDonald K.C., Chapman B.D., Jensen K., Podest E., Tessler Z.D., Bohn T.J., Zimmermann R.* Development and Evaluation of a Multi-Year Fractional Surface Water Data Set Derived from Active/Passive Microwave Remote Sensing Data // *Remote Sens.* 2015. V. 7. P. 16688–16732. <https://doi.org/10.3390/rs71215843>
- Sharkov E.A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations, ser. Springer Praxis Books in Geophysical Sciences. Berlin. Germany: Springer-Verlag. 2003.
- Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Ivanov V.V., Boyarskii D.A., Alexeeva T.A., Komarova N.Y.* A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data // *Advances in Space Research.* 2015. V. 56. P. 1578.
- Tikhonov V., Khvostov I., Romanov A., Sharkov E.* Theoretical study of ice cover phenology at large freshwater lakes based on SMOS MIRAS data // *The Cryosphere.* 2018. V. 12. № 8. P. 2727–2740. <https://doi.org/10.5194/tc-12-2727-2018>
- Tikhonov V.V., Romanov A.N., Khvostov I.V., Alekseeva T.A., Sinitkiy A.I., Tikhonova M.V., Sharkov E.A., Komarova N.Yu.* Interannual variation of microwave radiation of the Gulf of Ob during the freezing season and relationship to hydrological and climate changes in the region // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2021. V. 18. Is. 6. P. 185–199. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-6-185-199>

---

---

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

---

---

### ХОЛОДНОЕ ПЯТНО НАД ЛОФОТЕНСКИМ ВИХРЕМ

© 2022 г. В. С. Травкин<sup>а</sup>, \*, Т. В. Белоненко<sup>а</sup>, А. А. Кубряков<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>б</sup>Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\*E-mail: v.travkin@spbu.ru

Поступила в редакцию 10.12.2021 г.

В работе проводится совместный анализ данных Aqua/MODIS, океанического реанализа GLORYS12V1 и атмосферного реанализа ERA5. Рассматривается квазипостоянный Лофотенский вихрь, расположенный в Норвежском море. Анализ карт SST обнаруживает существование холодного пятна в области расположения Лофотенского вихря в летне-осенний период. Совместный анализ спутниковых карт и данных GLORYS12V1 показывает, что основной причиной образования холодного пятна является подъем изопикн верхнего купола вихря и разрушение прогретого слоя, в результате чего более холодные изотермы выходят на поверхность. Выявлено, что во многих случаях холодное пятно сдвигается на периферию вихря в юго-восточном направлении, причем сдвиг может составлять несколько десятков километров. Причиной может являться вихревая адвекция частиц в антициклоническом вихре. Показано, что наряду с образованием холодного пятна наблюдается уменьшение на 10–30 м глубины верхнего квазиоднородного слоя над Лофотенским вихрем в летне-осенний период. Образование холодного пятна на поверхности воды сопровождается понижением температуры в приводных слоях атмосферы.

**Ключевые слова:** Лофотенский вихрь, линза, холодное пятно, прогретый слой, Aqua/MODIS, GLORYS12V1, реанализ ERA5, SST, SSH

**DOI:** 10.31857/S0205961422040066

#### ВВЕДЕНИЕ

Граница раздела океана и атмосферы является сложной термодинамической системой, в которой непрерывно протекают разнообразие по физической природе процессы, переносящие энергию из одной области системы в другую. Мировой океан является самой крупной подстилающей поверхностью атмосферы, играя ключевую роль в ее изменчивости за счет поглощения и выделения в атмосферу большей части солнечной энергии (Sun, Wu, 2021). На перераспределение тепла в Мировом океане от тропиков к полярным областям оказывает значительное влияние меридиональная термохалинная циркуляция (Richards, Straneo, 2015). Развитие глубокой конвекции в зимний период в высоких широтах приводит к вертикальному опусканию теплых и соленых вод и последующему формированию глубинных течений, представляющих собой нижнюю ветвь меридиональной термохалинной циркуляции. При этом наблюдается существенное влияние мезомасштабных вихрей на изменение термохалинных характеристик локальных водных масс (Richards, Straneo, 2015; Belonenko et al, 2020). При взаимодействии поверхности вод с атмосферой часть тепла высвобождается и переходит в атмосферу. Особо активные области океана, где обмен энергией с атмосферой осуществляется наиболее интенсивно, получили название “очаги взаимодействия океана и атмосферы” (Тимонов и др.,

1970; Лаппо и др., 1990). В Северной Атлантике в современных условиях глобального потепления и формировании короткопериодных колебаний климата очаги взаимодействия океана и атмосферы имеют важное значение. Одним из них является Норвежская энергоактивная зона с центром в Лофотенской котловине, расположенной в глубоководной части Норвежского моря. Соседство с Арктическим бассейном и роль Лофотенской котловины, как транзитного региона для атлантических вод, заставляет считать ее климатическое значение исключительно важным (Малинин и Шмакова, 2018). В центральной части котловины, где наблюдается увеличение толщины атлантических вод в промежуточном слое и где расположен квазипостоянный антициклонический Лофотенский вихрь, происходит активная передача тепла из океана в атмосферу (Richards, Straneo, 2015, Новоселова и Белоненко, 2020; Fedorov et al., 2021). Это способствует активному развитию глубокой зимней конвекции и обновлению глубинных атлантических вод.

Оценка среднемноголетних годовых значений суммарной теплоотдачи (значения турбулентного потока тепла и затрат тепла на испарение) в Норвежской энергоактивной зоне с центром в Лофотенской котловине составляет 125 Вт/м<sup>2</sup> (Малинин и Шмакова, 2018). В зимний период Лофотенская котловина характеризуется потерями тепла порядка 80 Вт/м<sup>2</sup> (Isachsen et al., 2007; Rich-

ards, Straneo, 2015), что способствует развитию конвекции до глубин более 1000 м (Yu et al., 2017; Raj et al., 2015; Fedorov et al., 2019).

Потери тепла в океане связаны с его охлаждением. Изменения стабильности и шероховатости морской поверхности, а также флуктуации скорости ветра способствуют развитию аномалий поверхностного потока тепла. Увеличение температуры поверхности океана (SST – Sea Surface Temperature) приводит к росту теплового потока, тогда как ее уменьшение способствует меньшему восходящему тепловому потоку, при этом более низкие скорости ветра приводят к существенной адаптации атмосферной влажности и температуры к быстро меняющейся SST, что в свою очередь способствует меньшим аномалиям теплового потока (Hausmann et al., 2017).

Прохождение ветра над относительно сильными градиентами SST, связанными с вихрями и океаническими фронтами, способствует развитию вертикальных и горизонтальных движений в нижележащих слоях за счет ослабления стратификации. Это приводит к дальнейшему росту разности между SST и температурой воздуха вблизи поверхности моря, особенно при высоких скоростях фонового ветра (Small et al., 2019). Чистый поток тепла на границе океан-атмосфера равен сумме солнечных потоков тепла (длинноволновая и коротковолновая радиация) и турбулентных потоков (скрытые и явные потоки тепла). Значения SST оказывают прямое влияние на оценки длинноволновой радиации и явных потоков тепла в атмосферу (Kumar et al., 2011).

В работе (Sun, Wu, 2021) исследуется пространственная зависимость между турбулентным тепловым потоком на поверхности и температурой воды на поверхности. Результаты численного моделирования показывают наличие корреляции между SST и оценками явных потоков тепла, что свидетельствует о тесной взаимосвязи между океаном и атмосферой. С другой стороны, отрицательная корреляция между этими характеристиками указывает на то, что потеря тепла с поверхности океана способствует уменьшению SST, что свидетельствует об атмосферном воздействии на океан. Другие исследования указывают на различия между потоками океан-атмосфера, связанными с мезомасштабными вихрями и значительно более крупными формами. Для масштабов менее 1000 км скорость ветра пропорциональна аномалиям SST, а дивергенция и завихренность напряжения ветра пропорциональна зональным и меридиональным градиентам SST (Schneider et al., 2015). Лофотенская котловина является тепловым резервуаром атлантических вод, заглубление которых в котловине определяет не только структуру ее водных масс, но и особенности процессов взаимодействия океан-атмосфера (Новоселова и Белоненко, 2020; Fedorov et al., 2021). В приповерхностном переносе тепла в Лофотенской кот-

ловине доминируют вклад среднего потока, поступающего с юга, и вихревая адвекция с востока.

## КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЛОФОТЕНСКОМ ВИХРЕ

Лофотенский вихрь (ЛВ) расположен в глубоководной части котловины (рис. 1). Наиболее вероятное положение центра вихря по контактным данным – 70° с.ш. 3.5° з.д. (Søiland et al., 2016), а по данным моделирования локализация ЛВ происходит в районе 69°–70° с.ш., 3°–5° в.д. ЛВ характеризуется локальным максимумом уровня моря и вихревой кинетической энергии (Volkov et al., 2015; Travkin, Belonenko, 2021). Зимняя конвекция является необходимым условием существования этого уникального природного феномена, так как она создает благоприятные условия его ежегодной регенерации (Блошкина и Иванов, 2016; Bashmachnikov et al., 2017). Другим механизмом, позволяющим поддерживать в центре котловины высокую антициклоническую завихренность, является захват мезомасштабных вихрей, отрывающихся от Норвежского течения (Белоненко и др., 2014; Volkov et al., 2015). Термохалинные характеристики ЛВ с теплым и соленым ядром существенно отличаются от характеристик окружающих вод (Yu et al., 2017; Белоненко и др., 2018; Travkin, Belonenko, 2019).

В данной работе совместно анализируются спутниковые карты SST (Sea Surface Temperature) – температуры поверхности и SSH (Sea Surface Height) – высоты поверхности океана. Анализ выявил, что в области расположения ЛВ значения SST понижены. Это означает, что на поверхности воды, а также в приводном слое океана над теплым ЛВ образуется холодное пятно. Анализ возможных причин наблюдаемого феномена является целью настоящей работы.

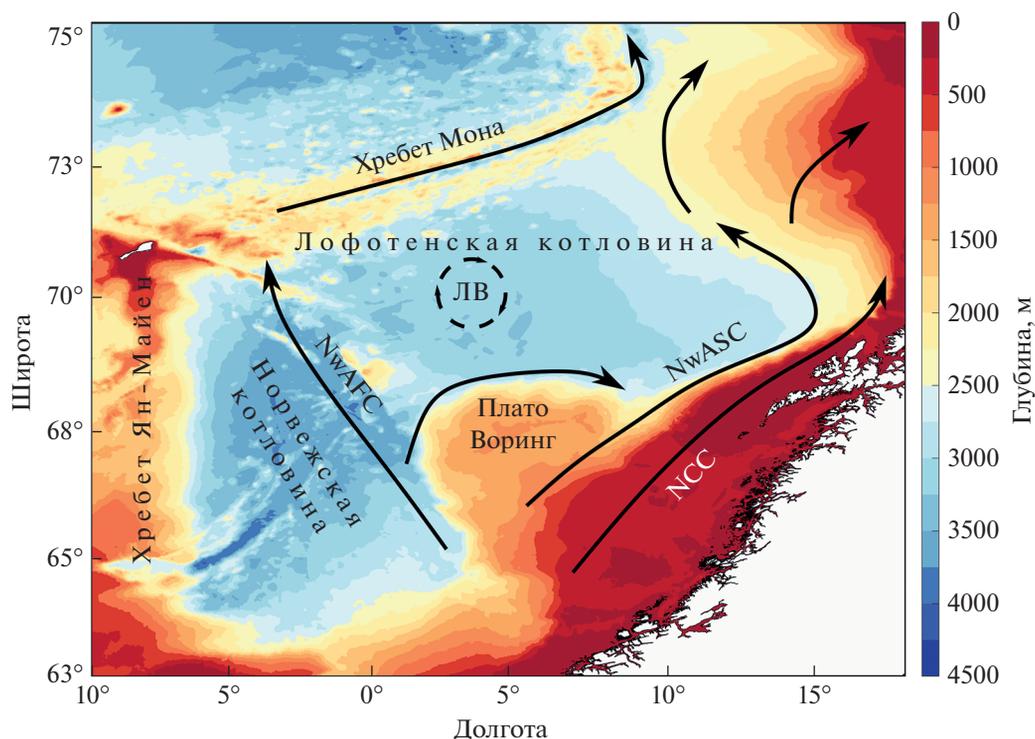
## ДАнные И МЕТОды

Все анализируемые данные получены из открытых источников. Их описание представлено в табл. 1.

Мы использовали данные GLORYS12V1 по глубине верхнего квазиоднородного слоя (ВКС), рассчитанные по методу Кара (Kara et al, 2000), который позволяет определить глубину перемешанного слоя как значение глубины, на которой температура воды изменилась на определенную величину по сравнению с поверхностью.

$$\Delta\sigma = \sigma(T_r, S_r) - \sigma(T_h, S_h),$$

где  $\Delta\sigma$  – эмпирический критерий плотности морской воды, равный разности между плотностью на поверхности моря  $\sigma(T_r, S_r)$  и  $\sigma(T_h, S_h)$  плотностью воды с той же соленостью, но при температуре, которая на 0.2° меньше, чем на поверхности моря. Первый горизонт, на котором разность значений плотности превышает  $\Delta\sigma$ ,



**Рис. 1.** Район исследования. Положение антициклонического Лофотенского вихря показано окружностью. Район наиболее вероятного расположения ЛВ показан пунктиром. Цветом показана топография дна (м), черными стрелками – ветви Норвежского течения (используются международные обозначения (Volkov et al., 2015): NwASC – Норвежское склоновое течение, NCC – Норвежское прибрежное течение, NwAFC – Норвежское фронтальное течение.

считается глубиной ВКС. Этот метод может использоваться только для профилей с высоким разрешением по вертикали.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Наблюдения холодного пятна над Лофотенским вихрем и его сезонный ход по спутниковым данным*

Карта средних значений SST по спутниковым данным Aqua/MODIS в исследуемом районе, построенная с осреднением за 2002–2019 гг., выявляет холодное пятно над ЛВ с температурой на 1–2 град. ниже окружающих вод (рис. 2). Частота появления такого холодного пятна имеет сезонный ход. На картах, построенных по среднемесячным данным, видно, что холодное пятно существует только в летне-осенний период, в то время как зимой и весной оно отсутствует. Формирование холодного пятна над ЛВ начинается в июне. В этот период постепенно образуется сезонный термоклин, вихрь начинает приобретать линзообразную форму, и на поверхности воды возникает обширная область пониженных значений SST. К июлю эта область локализуется в области расположения ЛВ, и наиболее четко холодное пятно проявляется в августе-октябре.

В ноябре понижение температуры над ЛВ также отмечается на среднемесячных картах (рис. 3).

Понижение температуры поверхности воды в районе Лофотенского вихря на несколько градусов подтверждается множественными спутниковыми SST снимками в различные сезоны, однако в большинстве случаев “холодное пятно” над вихрем наблюдается в теплый сезон, чаще всего в августе–сентябре. Мы проанализировали карты SST за отдельные месяцы (MODIS за 2002–2019 и GLORYS12V1 за 1999–2019 гг.) и выявили, что в среднем аномалии температуры над вихрем составляет 1–2°, но в отдельные годы они могут достигать 4°.

### *Вертикальная структура ЛВ и ее особенности в различные сезоны по данным GLORYS*

Для анализа причин появления холодного пятна и такого сезонного хода SST в вихре была исследована вертикальная структура вихря на основе реанализа GLORYS12V1. Эти данные демонстрируют, что ЛВ имеет ярко выраженную линзовидную структуру в согласии с предыдущими работами (см., например, Volkov et al., 2015; Блошкина и Иванов, 2016; Белоненко и др., 2018; Travkin, Belonenko, 2019). Ядро линзы расположено на глубинах 200–800 м (рис. 4, а). В верхней части купола положительные вертикальные скорости вызывают подъем глубинных вод. Такой процесс выклинивает холодные воды на поверхность и вызывает появление наблюдаемой холодной

Таблица 1. Используемые данные

Продукт	Описание	Источник
Aqua/MODIS (Level 3 Standard Mapped Image (SMI))	Среднемесячные измерения SST за период 2002–2019 гг. Пространственное разрешение – 4,63 км. Данные получены при использовании 31 и 32 канала (дневные наблюдения, ИК-диапазон, длина волны – 11 и 12 мкм, соответственно) сканирующего спектро радиометра среднего разрешения (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer – MODIS). MODIS обеспечивает глобальное покрытие поверхности Земли каждые 1–2 суток с высоким радиометрическим разрешением (12 бит). Массив 3 уровня (SMI) представляет собой данные за определенный период времени, спроецированные на пространственную сетку, при этом в каждой точке находится среднее значение искомого параметра за указанный период	<a href="http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov">http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov</a>
GLORYS12V1	Среднемесячные данные температуры, зональные и меридиональные составляющие скорости $u$ и $v$ , оценки MLD реанализа GLORYS12V1 за период 1999–2019 гг. Данные доступны на портале CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). Продукт GLORYS12V1 – это вихреразрешающий реанализ Мирового океана с пространственным разрешением $1/12^\circ$ на 50 горизонтах. Основой реанализа является модель NEMO с форсингом ECMWF ERA-Interim. В данных GLORYS12V1 ассимилируются совместно данные спутниковой альтиметрии, температура поверхности моря (Reynolds 0,25° AVHRR), концентрация морского льда и <i>in situ</i> вертикальные профили температуры и солёности. Наблюдения ассимилируются с помощью фильтра Калмана. Временная дискретность данных 1 сутки	<a href="https://resources.marine.copernicus.eu">https://resources.marine.copernicus.eu</a>
ERA5	ERA5 – это реанализ пятого поколения ECMWF для анализа глобальной погоды и климата за прошедшие 40–70 лет. ERA5 заменяет ранее использовавшийся реанализ ERA-Interim. Реанализ объединяет модельные данные и данные наблюдений при помощи их ассимиляции. Она основана на методе, используемом центрами численного прогнозирования погоды, где каждые несколько часов (12 часов в ECMWF) предыдущий прогноз оптимальным образом комбинируется с новыми доступными наблюдениями для получения новой наилучшей оценки состояния атмосферы, на основе которого выдается обновленный, улучшенный прогноз. ERA5 предоставляет ежечасные оценки большого количества атмосферных, океанических и наземных параметров. Пространственное разрешение данных реанализа – $0.25 \times 0.25^\circ$	<a href="https://cds.climate.copernicus.eu">https://cds.climate.copernicus.eu</a>

аномалии на поверхности. Во всех случаях холодное пятно в области расположения ЛВ образуется в периоды, когда линза уже сформирована и хорошо развита. В августе и сентябре линза достигает своих максимальных значений (Novoselova, 2022), и в эти месяцы отмечаются наибольшие градиенты SST в области расположения ЛВ (рис. 4, б).

*Смещение холодного пятна относительно центра вихря*

Совместный анализ карт SST и SSH выявил следующую особенность: во многих случаях холодное пятно на поверхности вихря сдвигается на его периферию относительно центра. Например,

на рис. 5 видно, что центр аномалий SSH имеет координаты  $70.08^\circ$  с.ш.,  $3.08^\circ$  в.д., в то время как центр аномалий SST –  $69.73^\circ$  с.ш.,  $4.06^\circ$  в.д., т.е. холодное пятно расположено относительно центра ЛВ к юго-востоку, расстояние между центрами составляет 46 км. В Лофотенской котловине более холодные воды расположены с северной и северо-западной части вихря (Sandalyuk et al., 2020), и это согласуется со схемой основных течений в регионе (Richards, Straneo, 2015). Масштаб ЛВ на поверхности может достигать 100 км (рис. 5, а), и холодное пятно с севера сдвигается на его юго-восточную периферию (рис. 5, б).

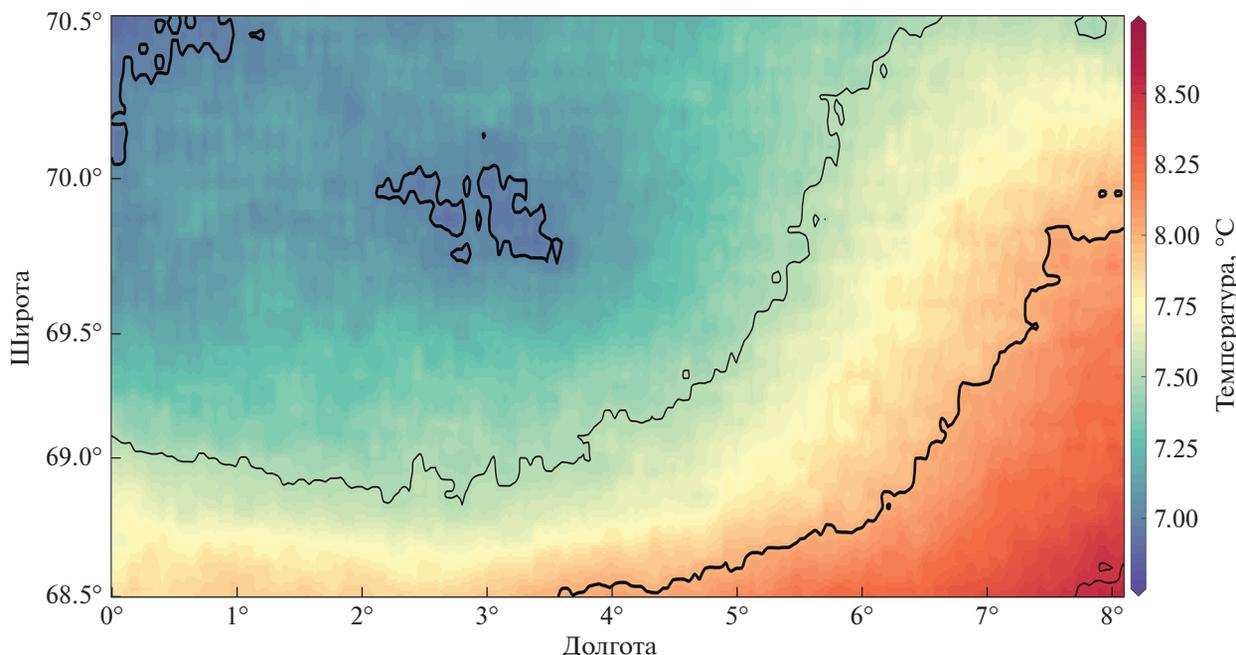


Рис. 2. Средние значения SST по данным Aqua/MODIS за период 1999–2019 гг.

Мы проанализировали совместно изображения SSH и SST, построенные по среднемесячным данным за каждый месяц 1999–2019 гг., и обнаружили, что смещение холодного пятна на юго-восток характерно в основном для августа и сентября, т.е. тогда, когда линза достигает своих максимальных размеров (Novoselova, 2022). Всего нами рассматривалось 199 пар совместных распределений SSH и SST, из которых в 102 случаях (51%) расстояние между центрами не превышало 10 км (рис. 6). В остальных случаях отрицательные аномалии SST, соответствующие холодному пятну над вихрем, смещались в большей степени относительно аномалий SSH на юго-восток. В 19% случаев холодное пятно смещалось на расстояние в диапазоне 10–20 км, в 7% – на расстояния в диапазоне 20–30 и 40–50 км, в 4% – на расстояния 30–40 км. Следует отметить, что расстояния между центрами определялись автоматически, и тогда, когда расстояния между центрами аномалий превышало радиус вихря 50 км, метод мог учитывать центры аномалий, относящиеся к разным вихревым структурам, поэтому в дальнейшем мы не будем их рассматривать.

#### *Приводная температура воздуха над Лофотенским вихрем*

На рис. 7 видно, что холодное пятно над ЛВ, образующееся в результате понижения температуры поверхностной воды, приводит к понижению температуры воздуха в данном районе. Данные атмосферного реанализа ERA5 подтверждают наличие отрицательных аномалий температуры приводного воздуха на высоте 2 м в период существования

холодного пятна над вихрем. Все это означает, что в период образования холодного пятна уменьшаются потоки тепла в атмосферу.

#### *Верхний квазиоднородный слой над Лофотенским вихрем*

Появление холодного пятна в летне-осенний период над ЛВ сопровождается уменьшением глубины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) в вихре. На рис. 8, б видно, что минимальные значения ВКС в сентябре 2003 г. наблюдаются непосредственно над линзой ЛВ. Холодное пятно локализуется в районе 69.8° с.ш., 1° в.д. (рис. 8, а). Видно, что здесь достигаются также минимальные значения ВКС (рис. 8, б). Если в вихре значения ВКС составляют всего 20 м, то вне вихря они превышают 30 м. Изопикны верхнего купола линзы прогибаются к поверхности и частично выходят на поверхность (рис. 8, б). Именно это способствует уменьшению ВКС над вихрем.

Совместный анализ спутниковых карт и вертикальных разрезов по данным GLORYS12V1 показал, что минимальные значения ВКС над линзой характерны для летне-осенних месяцев и сохраняются вплоть до начала развития зимней конвекции. Осенью значения ВКС над линзой постепенно начинают увеличиваться. В ноябре линза еще сохраняет свою форму (рис. 9, а), но оценки ВКС в области расположения вихря уже составляют около 70 м. На рис. 9, а видно, что отдельные изопикны над линзой в ноябре 2000 г. выходят на поверхность, что впоследствии приведет к разрушению линзы и началу зимней конвекции (Федоров и др. 2018; Травкин и Белоненко,

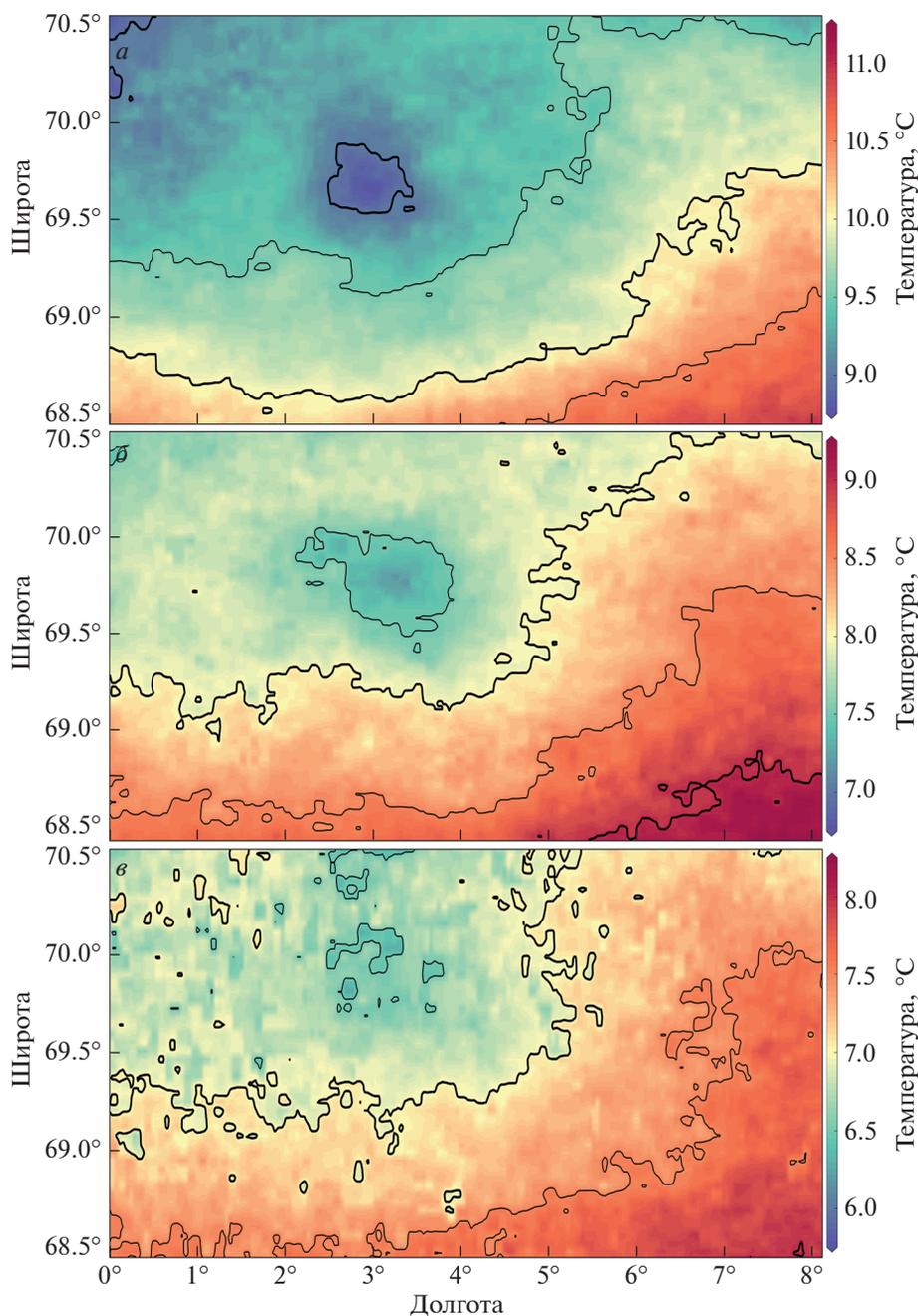


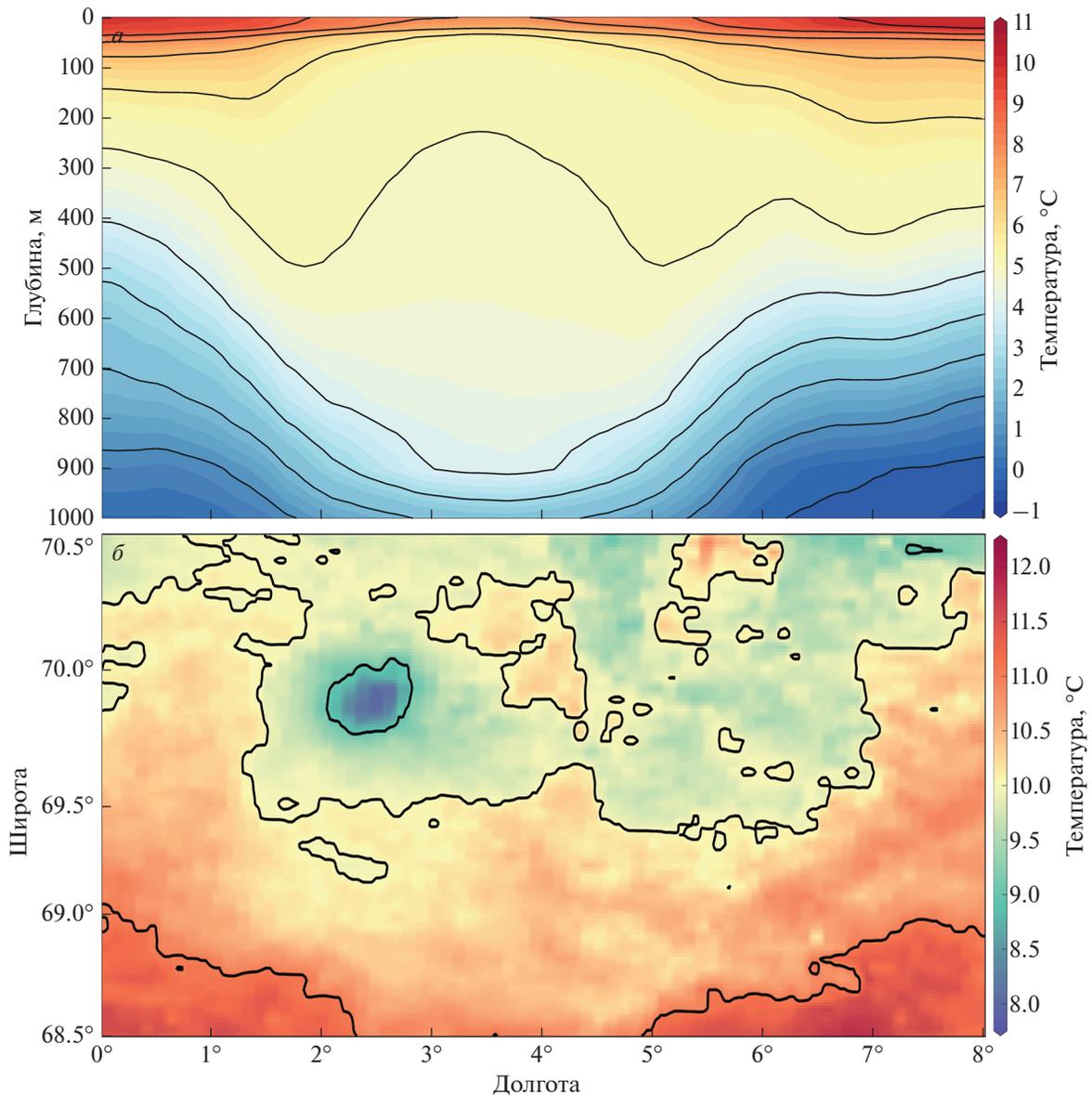
Рис. 3. Среднемесячные карты SST (сентябрь–ноябрь) за период 1999–2019 гг.

2020). Вне области вихря оценки ВКС значительно больше и превышают 90 м (рис. 9, б), хотя еще в сентябре глубина ВКС над линзой не превышала 10–20 м, а вне области вихря эти оценки составляли на 30–40 м больше (не показано).

#### ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Теплые и соленые атлантические воды в Лофотенской котловине занимают обширную область, образуя огромный тепловой резервуар в

Норвежском море (Belonenko et al., 2020). При взаимодействии поверхности вод с атмосферой часть тепла высвобождается и переходит в атмосферу. ЛВ является центром Норвежской энергоактивной зоны, где происходит максимальная теплоотдача в атмосферу. Повышение теплоотдачи происходит преимущественно в зимний период и характеризуется отрицательным потоком плавучести в верхних слоях океана (Isachsen et al., 2007; Richards, Straneo, 2015; Малинин и Шмако-



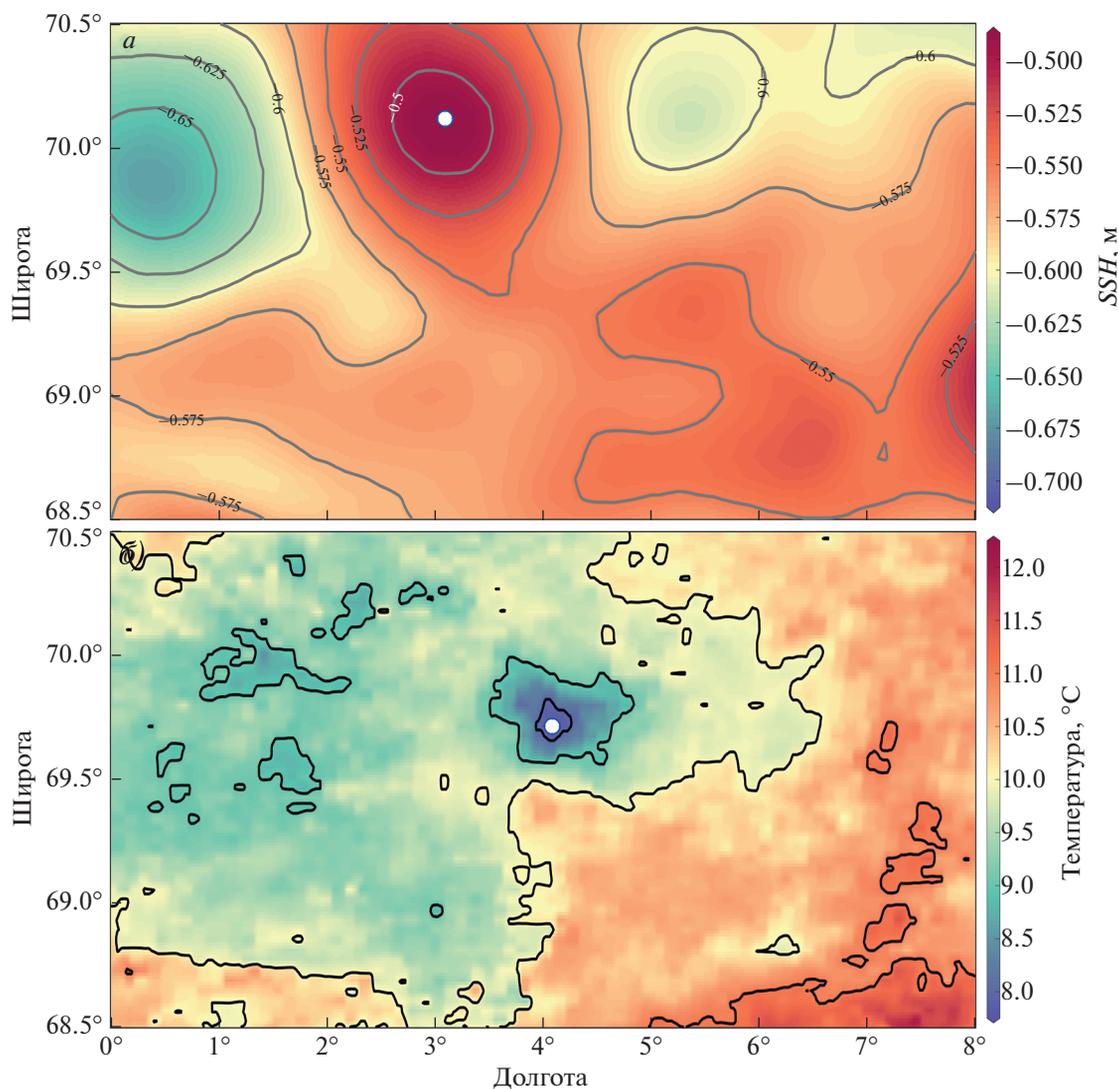
**Рис. 4.** Вертикальный разрез через ядро Лофотенского вихря по 69.8° с.ш. поля температуры по данным реанализа GLORYS12V1 за август 2010 г. (а) и карта SST по данным MODIS (б).

ва, 2018). В летне-осенний период процессы теплоотдачи ослабевают, а в области расположения ЛВ по спутниковым снимкам наблюдается холодное пятно с температурой, имеющей меньшие значения, чем температура воды вне вихря. При этом приводная температура воздуха, соприкасающегося с поверхностью воды, также имеет пониженные значения в летний период.

В работе (Блошкина и Иванов, 2016) детально воспроизведен жизненный годовой цикл ЛВ, форма которого изменяется в течение года. В зимне-весенний период доминируют конвективные процессы, когда сезонный термоклин разру-

шается, и зимняя конвекция определяет эволюцию вихря, достигая в центре вихря 1000 м (Федоров и др., 2019). В этот период вихрь приобретает форму полуэллипсоида (Микаэлян и др., 2020). В летне-осенний период ЛВ представлен в виде линзы с теплой и соленой водой.

Образование линзы сопровождается разрушением верхнего нагретого слоя с повышенными значениями температуры и выходом на поверхность нижележащих изотерм с меньшими относительно окружающей воды значениями. Мы проанализировали среднемесячные распределения MODIS за 2002–2019 и построили соответ-



**Рис. 5.** Карты SSH по данным GLORYS12V1 (*a*) и SST по данным Aqua/MODIS (*б*) за август 2004 г. Точками показаны геометрические центры аномалий.

ствующие вертикальные разрезы через центр ЛВ по данным GLORYS12V1 со среднемесячным осреднением. Совместный анализ спутниковых карт и данных GLORYS12V1 показал, что внешний купол линзы сжимает изопикны, поднимая их вверх и разрушая поверхностный нагретый слой воды. Более холодная вода с нижних горизонтов устремляется вверх, и на поверхности образуется “пятно” с пониженными значениями температуры. В результате в области вихря изопикнические поверхности, соответствующие нижним слоям с меньшими значениями температуры, выходят на поверхность (см. рис. 4, *a*, 8, *б* и 9, *a*). Таким образом, основная причина появления холодного пятна над линзой — это подъем изопикн непосредственно над линзой в летне-осенний период.

Сезонная модуляция проявления холодного пятна связана прежде всего с условиями вертикального перемешивания: в летний период резкий прогрев маскирует подъем изопикн над линзой, а в зимний — глубокая конвекция разрушает верхнюю часть купола. Наиболее четко холодное пятно проявляется в августе и сентябре — в период разрушения термоклина и заглужения ВКС.

Совместный анализ карт SSH и SST по данным Aqua/MODIS и GLORYS12V1 выявил смещение холодного пятна SST относительно SSH на юго-восток. Это несоответствие является следствием вихревой адвекции, при которой антициклоническое вращение частиц с пониженными значениями температуры, расположенными на севере и северо-западе, переносит эти ча-

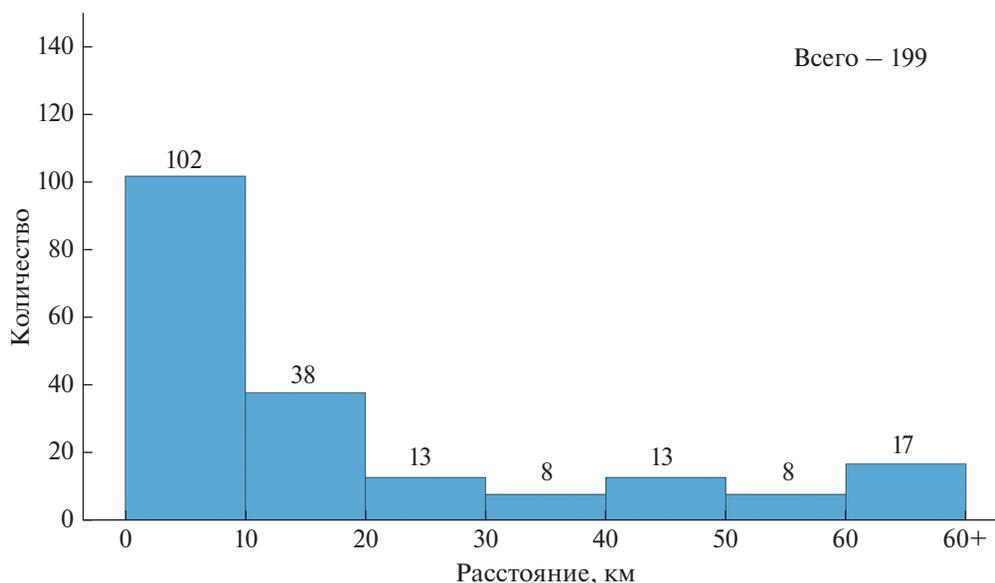


Рис. 6. Число наблюдений сдвига между центрами аномалий SSH и SST на спутниковых картах.

стицы на юго-восточную периферию Лофотенского вихря. В работе (Кубряков и др., 2016) показано, что распределение температурных аномалий в вихре зависит от полярности вихря. Холодная вода, поступающая в антициклон с севера и северо-востока, в процессе эволюции вихря механически переносится к юго-востоку вихря, тем самым создавая сдвиг аномалий SST относительно аномалий SSH. Этот сдвиг чаще всего наблюдается в августе и сентябре (см. рис. 5).

Поднятие изопикн в вихре способствует уменьшению глубины ВКС в вихре. Этот эффект наиболее характерен наблюдается в начале летнего сезона, достигает максимальных параметров в августе и сентябре – в период наибольшего развития внутритермоклинной линзы и продолжается до ноября включительно. При этом понижение температуры поверхности воды сопровождается уменьшением ВКС в области Лофотенского вихря. Действительно, уменьшение ВКС на 10–20 м непосредственно над линзой наблюдается в августе–сентябре и достигает 30 м к ноябрю. Отметим, что наблюдаемое уменьшение ВКС над вихрем в летне-осенний сезон нигде ранее не отмечалось. Возможно, это связано с тем, что оценки ВКС обычно анализируются только для зимних месяцев.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Сезонная эволюция структуры Лофотенского вихря исследована при поддержке гранта РФФ 21-77-10052.

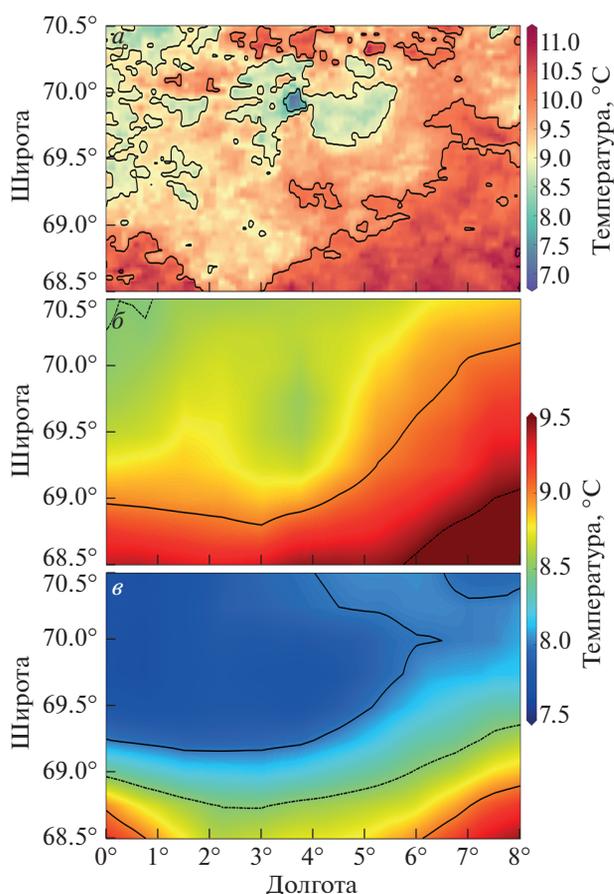


Рис. 7. Карта SST по осредненным за сентябрь 2004 данным MODIS (а); температура воздуха в Лофотенской котловине на высоте 2 м над уровнем моря по данным ERA5 за 22 (б) и 29 сентября 2004 г. (в).

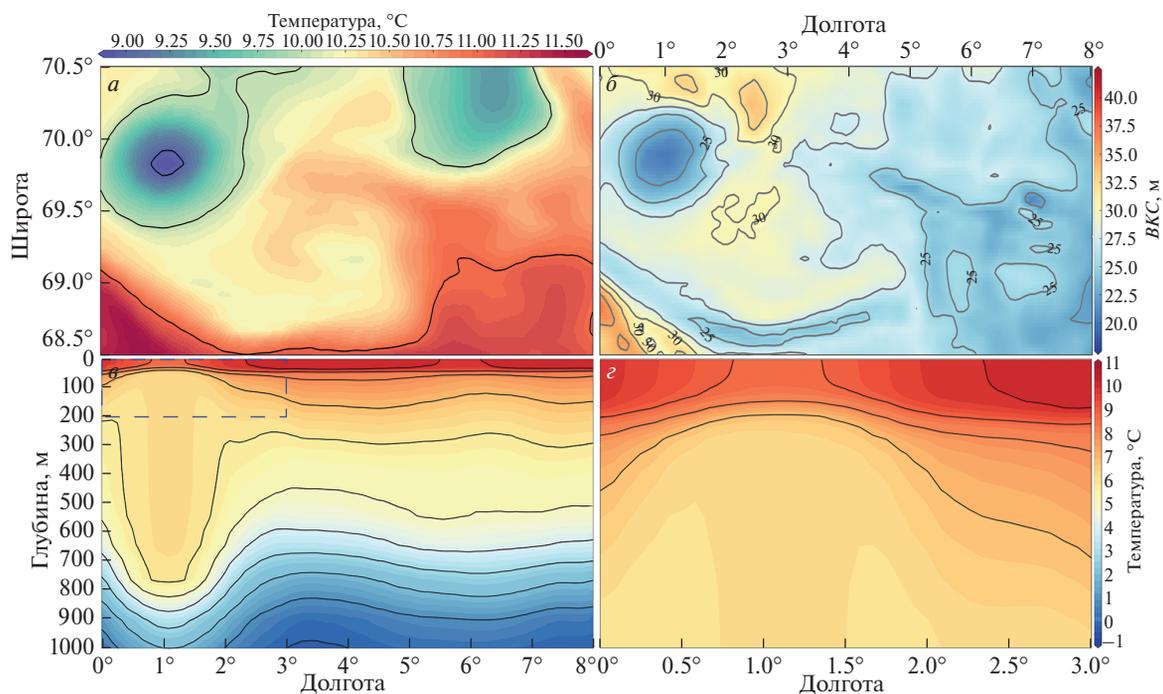


Рис. 8. Распределение температуры поверхности океана по данным GLORYS12V1 (а), оценка ВКС (б) и вертикальный разрез температуры по широте 69.8° с.ш. в ЛВ (в, г) в сентябре 2003 г.

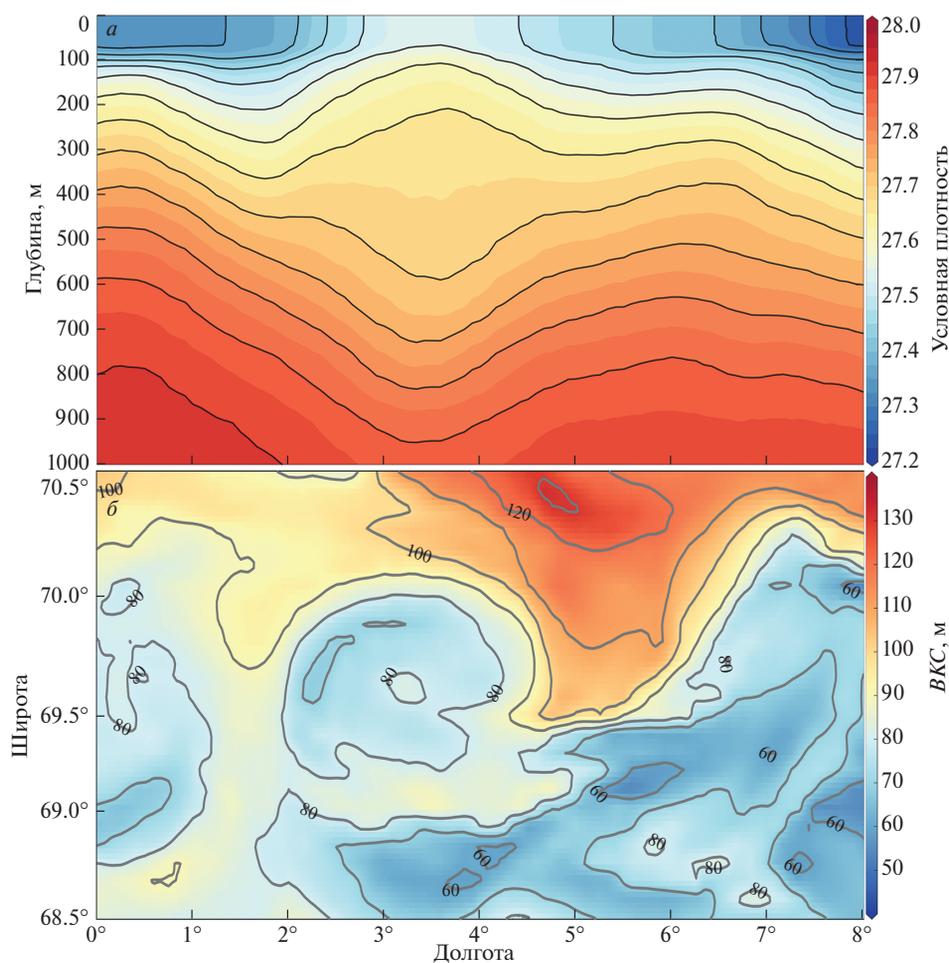


Рис. 9. Распределение плотности (а) и оценка ВКС (б) в ЛВ в ноябре 2000 г. по данным GLORYS12V1.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоненко Т.В., Волков Д.Л., Норден Ю.Е., Ожигин В.К.* Циркуляция вод в Лофотенской котловине Норвежского моря // Вестник СПбГУ. 2014. Сер. 7. Вып. 2. С. 108–121.
- Белоненко Т.В., Колдунов А.В., Сентябов Е.В., Карсаков А.Л.* Термохалинная структура Лофотенского вихря Норвежского моря на основе экспедиционных исследований и по данным гидродинамического моделирования // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63. Вып. 4. С. 502–519.
- Блошкина Е.В., Иванов В.В.* Конвективные структуры в Норвежском и Гренландском морях по результатам моделирования с высоким пространственным разрешением // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. № 361. С. 146–168.
- Кубряков А.А., Белоненко Т.В., Станичный С.В.* Влияние синоптических вихрей на температуру морской поверхности в северной части Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 124–133. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-2-34-43>
- Ланно С.С., Гулев С.К., Рождественский А.Е.* Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан-атмосфера и энергоактивные области Мирового океана // Ленинград. Гидрометеиздат. 1990. 336 с.
- Малинин В.Н., Шамакова В.Ю.* Изменчивость энергоактивных зон в Северной Атлантике // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 4. С. 55–70.
- Микаэлян А.С., Зацепин А.Г., Кубряков А.А.* Воздействие мезомасштабной вихревой динамики на биопродуктивность морских экосистем (обзор) // Морской гидрофизический журн. 2020. Т. 36. № 6. С. 646–675. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-6-646-675>
- Новоселова Е.В., Белоненко Т.В.* Изопикническая адвекция в Лофотенской котловине Норвежского моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13. № 3. С. 56–67. <https://doi.org/10.7868/S2073667320030041>
- Тимонов В.В., Смирнова А.И., Непон К.И.* Очаги взаимодействия Северной Атлантики с атмосферой // Океанология. 1970. Т. 10. № 5. С. 745–749.
- Травкин В.С., Белоненко Т.В.* Оценка глубины зимней конвекции в Лофотенской котловине Норвежского моря и методы ее оценки // Гидрометеорология и экология (Ученые записки РГГМУ). 2020. Т. 59. С. 67–83. <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-59-67-83>
- Федоров А.М., Башмачников И.Л., Белоненко Т.В.* Локализация областей глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингер // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63. Вып. 3. С. 345–362. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.306>
- Федоров А.М., Башмачников И.Л., Белоненко Т.В.* Зимняя конвекция в Лофотенской котловине по данным буев ARGO и гидродинамического моделирования // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2019. Т. 64. Вып. 3. С. 491–511. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.308>
- Bashmachnikov I., Sokolovskiy M., Belonenko T., Volkov D., Isachsen P.E., Xavier C.* On the vertical structure and stability of the Lofoten vortex in the Norwegian Sea // Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers. 2017. I. 128. V. 5. P. 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.08.001>
- Belonenko T., Zinchenko V., Gordeeva S., Raj R.P.* Evaluation of Heat and Salt Transports by Mesoscale Eddies in the Lofoten Basin // Russian J. Earth Sciences. 2020. V. 20. ES6011. <https://doi.org/10.2205/2020ES000720>
- Fedorov A.M., Raj R.P., Belonenko T.V., Novoselova E.V., Bashmachnikov I.L., Johannessen J.A., Pettersson, L.H.* Extreme Convective Events in the Lofoten Basin // Pure Appl. Geophys. 2021. № 178. P. 2379–2391. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02749-4>
- Hausmann U., Czaja A., Marshall J.* Mechanisms controlling the SST air–sea heat flux feedback and its dependence on spatial scale // Climate Dyn. 2017. № 48. P. 1297–1307. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3142-3>
- Isachsen P.E., Mauritzen C., Svendsen H.* Dense water formation in the Nordic Seas diagnosed from sea surface buoyancy fluxes // Deep Sea Res., Part I. 2007. № 54. P. 22–41.
- Kara A.B., Rochford P.A., Hurlburt H.E.* An optimal definition for ocean mixed layer depth // J. Geophys. Res. 2000. № 105(C7). P. 16803–16821.
- Novoselova E.V.* Seasonal variability of the potential vorticity in the Lofoten Vortex // Russian J. Earth Sciences. 2022. In Print.
- Praveen Kumar B., Vialard J., Lengaigne M., Murty V.S.N., McPhaden M.J.* TropFlux: air–sea fluxes for the global tropical oceans—description and evaluation // Climate Dynamics. 2011. № 38. P. 1521–1543. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1115-0>
- Raj R.P., Chafik L., Nilsen J.E.Ø., Eldevik T., Halo I.* The Lofoten Vortex of the Nordic Seas // Deep-Sea Res. I. 2015. Vol. 96. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.10.011>
- Richards C.G., Straneo F.* Observations of Water Mass Transformation and Eddies in the Lofoten Basin of the Nordic Seas // J. Physical Oceanography. 2015. I. 6. V. 45. P. 1735–1756. <https://doi.org/10.1175/jpo-d-14-0238.1>
- Sandalyuk N.V., Bosse A., Belonenko T.V.* The 3D structure of Mesoscale Eddies in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea: A composite analysis from altimetry and in situ data // J. Geophysical Research: Oceans. 2020. № 125. e2020JC016331. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020JC016331>
- Schneider N., Qiu B.* The Atmospheric Response to Weak Sea Surface Temperature Fronts // American Meteorological Society. 2015. V. 72. P. 3356–3377. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0212.1>
- Søiland H., Chafik L., Rossby T.* On the long-term stability of the Lofoten Basin Eddy // J. Geophys. Res. Oceans. 2016. № 121. P. 4438–4449. <https://doi.org/10.1002/2016JC011726>
- Small R.J., Bryan F.O., Bishop S.P., Tomas R.A.* Air–Sea Turbulent Heat Fluxes in Climate Models and Observational Analyses: What Drives Their Variability? // J. Climate. 2019. V. 32. P. 2397–2421. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0576.1>
- Sun X., Wu R.* Spatial scale dependence of the relationship between turbulent surface heat flux and SST // Climate Dynamics. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05957-9>
- Travkin V.S., Belonenko T.V.* Seasonal variability of mesoscale eddies of the Lofoten Basin using satellite and model data // Russian J. Earth Sciences. V. 19. № 5. 2019. ES5004. <https://doi.org/10.2205/2019ES000676>

Travkin V.S., Belonenko T.V. Study of the Mechanisms of Vortex Variability in the Lofoten Basin Based on Energy Analysis // *Physical Oceanography*, [e-journal]. 2021. V. 28. I. 3. P. 294–308.  
<https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-3-294-308>  
 Volkov D.L., Kubryakov A.A., Lumpkin R. Formation and variability of the Lofoten basin vortex in a high-resolution ocean

model // *Deep Sea Res., Part I*. 2015. V. 105. P. 142–157.  
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.09.001>  
 Yu L.-S., Bosse A., Fer I., Orvik K.A., Bruvik E.M., Hessevik I., Kvalsund K. The Lofoten Basin eddy: Three years of evolution as observed by Seagliders // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017. № 122. P. 6814–6834.  
<https://doi.org/doi:10.1002/2017JC012982>

## Cold Spot over the Lofoten Vortex

V. S. Travkin<sup>1</sup>, T. V. Belonenko<sup>1</sup>, and A. A. Kubryakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

<sup>2</sup>*Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

The paper provides a joint analysis of Aqua/MODIS data, global ocean reanalysis GLORYS12V1 and atmospheric reanalysis ERA5. We consider the quasi-permanent Lofoten Vortex located in the Norwegian Sea. Analysis of SST maps reveals the existence of a cold spot in the area of the Lofoten Vortex in the summer-autumn period. A joint analysis of satellite maps and GLORYS12V1 data shows that the main reason for the formation of a cold spot is the rise of the isopycnals of the upper dome of the vortex and the destruction of the heated layer, as a result of which colder isopycnals come to the surface. It has been revealed that in many cases the cold spot shifts to the periphery of the vortex in a south-easterly direction, and the shift can be several tens of kilometers. The reason may be the vortex advection of particles in an anticyclonic vortex. It is shown that along with the formation of a cold spot, there is a 10–30 m decrease in the depth of the upper quasi-homogeneous layer above the Lofoten Vortex in the summer-autumn period. The formation of a cold spot on the water surface is accompanied by a decrease in temperature in the drive layers of the atmosphere.

*Keywords:* Lofoten vortex, lens, cold spot, heated layer, Aqua/MODIS, GLORYS12V1, reanalysis ERA5, SST, SSH

### REFERENCES

Belonenko T.V., Volkov D.L., Norden Yu.E., Ozhigin V.K. Tsirkulyatsiya vod v Lofotenskoj kotlovine Norvezhskogo morya [Water circulation in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea] // *Vestnik SPbGU*. 2014. I. 2. № 7. P. 108–121. (In Russian).  
 Belonenko T.V., Koldunov A.V., Sentyabov E.V., Karsakov A.L. Termohalinnaya struktura Lofotenskogo vikhrya Norvezhskogo morya na osnove ekspeditsionnykh issledovaniy i po dannym gidrodinamicheskogo modelirovaniya [Thermohaline structure of the Lofoten vortex in the Norwegian Sea based on expeditionary studies and hydrodynamic modeling data] // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2018. I. 4. V. 63. P. 502–519. (In Russian).  
 Bloschkina E.V., Ivanov V.V. Konvektivnyye struktury v Norvezhskom i Grenlandskom moryakh po rezul'tatam modelirovaniya s vysokim prostranstvennym razresheniyem [Convective structures in the Norwegian and Greenland seas based on the results of modeling with high spatial resolution] // *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii*. 2016. № 361. P. 146–168. (In Russian).  
 Kubryakov A.A., Belonenko T.V., Stanichnyy S.V. Vliyaniye sinopticheskikh vikhrey na temperaturu morskoy poverkhnosti v severnoy chasti Tikhogo okeana [Impact of the mesoscale eddies on the temperature of the sea surface in the northern part of the Pacific Ocean] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. V. 13. № 2. P. 124–133. (In Russian).  
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-2-34-43>  
 Lappo S.S., Gulev S.K., Rozhdestvenskiy A.E. Krupnomasshtabnoye teplovoye vzaimodeystviye v sisteme okean-

atmosfera i energoaktivnyye oblasti Mirovogo okeana [Large-scale thermal interaction in the ocean-atmosphere system and energy-active regions of the World Ocean] // *Leningrad. Gidrometeoizdat*. 1990. 336 p. (In Russian).  
 Malinin V.N., Shmakova V.Yu. Izmenchivost' energoaktivnykh zon v Severnoy Atlantike [Variability of energy-active zones in the North Atlantic] // *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. 2018. V. 4. P. 55–70. (In Russian).  
 Mikaelyan A.S., Zatsepin A.G., Kubryakov A.A. Vozdeystviye mezomasshtabnoy vikhrevoy dinamiki na bioproduktivnost' morskikh ekosistem (obzor) [The impact of mesoscale eddy dynamics on the bioproductivity of marine ecosystems (review)] // *Morskoy gidrofizicheskii zhurnal*. 2020. V. 36. № 6. P. 646–675. (In Russian).  
<https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-6-646-675>  
 Novoselova E.V., Belonenko T.V. Izopiknicheskaya advektsiya v Lofotenskoj kotlovine Norvezhskogo moraya [Isopycnal Advection in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea] // *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020. V. 13. № 3. P. 56–67. (In Russian).  
<https://doi.org/10.7868/S2073667320030041>  
 Timonov V.V., Smirnova A.I., Nepov K.I. Ochagi vzaimodeystviya Severnoy Atlantiki s atmosferoy [The centers of interaction of the North Atlantic with the atmosphere] // *Okeanologiya*. 1970. V. 10. № 5. P. 745–749. (In Russian).  
 Travkin V.S., Belonenko T.V. Otsenka glubiny zimney konveksii v Lofotenskoj kotlovine Norvezhskogo morya i metody yeye otsenki [Mixed layer depth in winter convection in the Lofoten Basin in the Norwegian Sea and assessment methods] // *Gidrometeorologiya i ekologiya (Uchenyye zapiski RGGMU)*. 2020. V. 59. P. 67–83. (In

- Russian).  
<https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-59-67-83>  
*Fedorov A.M., Bashmachnikov I.L., Belonenko T.V.* Lokalizatsiya oblastey glubokoy konveksii v moryakh Severo-Yevropeyskogo basseyna, Labrador i Irminger [Localization of areas of deep convection in the Nordic seas, the Labrador Sea and the Irminger Sea] // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2018. I. 3. V. 63. P. 345–362. (In Russian).  
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.306>  
*Fedorov A.M., Bashmachnikov I.L., Belonenko T.V.* Zimnyaya konveksiya v Lofotenskoj kotlovine po dannym buyev ARGO i gidrodinamicheskogo modelirovaniya [Winter convection in the Lofoten Basin according to ARGO buoys and hydrodynamic modeling] // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2019. I. 3. V. 64. P. 491–511. (In Russian).  
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.308>  
*Bashmachnikov I., Sokolovskiy M., Belonenko T., Volkov D., Isachsen P.E., Xavier C.* On the vertical structure and stability of the Lofoten vortex in the Norwegian Sea // *Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers*. 2017. I. 128. V. 5. P. 1–27.  
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.08.001>  
*Belonenko T., Zinchenko V., Gordeeva S., Raj R.P.* Evaluation of Heat and Salt Transports by Mesoscale Eddies in the Lofoten Basin // *Russian J. Earth Sciences*. 2020. V. 20. ES6011.  
<https://doi.org/10.2205/2020ES000720>  
*Fedorov A.M., Raj R.P., Belonenko T.V., Novoselova E.V., Bashmachnikov I.L., Johannessen J.A., Pettersson, L.H.* Extreme Convective Events in the Lofoten Basin // *Pure Appl. Geophys.* 2021. № 178. P. 2379–2391.  
<https://doi.org/10.1007/s00024-021-02749-4>  
*Hausmann U., Czaja A., Marshall J.* Mechanisms controlling the SST air–sea heat flux feedback and its dependence on spatial scale // *Climate Dyn.* 2017. № 48. P. 1297–1307.  
<https://doi.org/10.1007/s00382-016-3142-3>  
*Isachsen P.E., Mauritzen C., Svendsen H.* Dense water formation in the Nordic Seas diagnosed from sea surface buoyancy fluxes // *Deep Sea Res., Part I*. 2007. № 54. P. 22–41.  
*Kara A.B., Rochford P.A., Hurlburt H.E.* An optimal definition for ocean mixed layer depth // *J. Geophys. Res.* 2000. № 105(C7). P. 16803–16821.  
*Novoselova E.V.* Seasonal variability of the potential vorticity in the Lofoten Vortex // *Russian J. Earth Sciences*. 2022. In Print.  
*Praveen Kumar B., Vialard J., Lengaigne M., Murty V.S.N., McPhaden M.J.* TropFlux: air–sea fluxes for the global tropical oceans—description and evaluation // *Climate Dynamics*. 2011. № 38. P. 1521–1543.  
<https://doi.org/10.1007/s00382-011-1115-0>  
*Raj R.P., Chafik L., Nilsen J.E.Ø., Eldevik T., Halo I.* The Lofoten Vortex of the Nordic Seas // *Deep-Sea Res. I*. 2015. V. 96. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.10.011>  
*Richards C.G., Straneo F.* Observations of Water Mass Transformation and Eddies in the Lofoten Basin of the Nordic Seas // *J. Physical Oceanography*. 2015. I. 6. V. 45. P. 1735–1756.  
<https://doi.org/10.1175/jpo-d-14-0238.1>  
*Sandalyuk N.V., Bosse A., Belonenko T.V.* The 3D structure of Mesoscale Eddies in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea: A composite analysis from altimetry and in situ data // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020. № 125. e2020JC016331. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020JC016331>.  
*Schneider N., Qiu B.* The Atmospheric Response to Weak Sea Surface Temperature Fronts // *American Meteorological Society*. 2015. V. 72. P. 3356–3377.  
<https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0212.1>  
*Søiland H., Chafik L., Rossby T.* On the long-term stability of the Lofoten Basin Eddy // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2016. № 121. P. 4438–4449.  
<https://doi.org/10.1002/2016JC011726>  
*Small R.J., Bryan F.O., Bishop S.P., Tomas R.A.* Air–Sea Turbulent Heat Fluxes in Climate Models and Observational Analyses: What Drives Their Variability? // *J. Climate*. 2019. V. 32. P. 2397–2421.  
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0576.1>  
*Sun X., Wu R.* Spatial scale dependence of the relationship between turbulent surface heat flux and SST // *Climate Dynamics*.  
<https://doi.org/10.1007/s00382-021-05957-9>  
*Travkin V.S., Belonenko T.V.* Seasonal variability of mesoscale eddies of the Lofoten Basin using satellite and model data // *Russian J. Earth Sciences*. V 19. № 5. 2019. ES5004.  
<https://doi.org/10.2205/2019ES000676>  
*Travkin V.S., Belonenko T.V.* Study of the Mechanisms of Vortex Variability in the Lofoten Basin Based on Energy Analysis // *Physical Oceanography, [e-journal]*. 2021. V. 28. I. 3. P. 294–308.  
<https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-3-294-308>  
*Volkov D.L., Kubryakov A.A., Lumpkin R.* Formation and variability of the Lofoten basin vortex in a high-resolution ocean model // *Deep Sea Res., Part I*. 2015. V. 105. P. 142–157.  
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.09.001>  
*Yu L.-S., Bosse A., Fer I., Orvik K.A., Bruvik E.M., Hessevik I., Kvalsund K.* The Lofoten Basin eddy: Three years of evolution as observed by Seagliders // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017. № 122. P. 6814–6834.  
<https://doi.org/doi:10.1002/2017JC012982>

---

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

---

---

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИЗМЕНЕНИЙ ОПОЛЗНЕВЫХ ОЧАГОВ  
В КРИОЛИТОЗОНЕ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСТАНЦИОННЫХ СЪЕМОК  
(НА ПРИМЕРЕ о. БАНКС)**© 2022 г. Т. В. Орлов<sup>а, \*</sup>, М. В. Архипова<sup>а</sup>, В. В. Бондарь<sup>а</sup><sup>а</sup>Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия

\*E-mail: tim.orlov@gmail.com

Поступила в редакцию 17.10.2021 г.

Оползневые процессы являются одними из самых массовых и активных экзогенных процессов, которые в настоящее время все чаще проявляются в зонах вечной мерзлоты в результате изменений климата, требуя пристального внимания и изучения. Анализ весьма подверженной этим процессам территории одного из островов Северной Канады, острова Банкс, подтвердил и расширил более ранние исследования оползневых процессов в этой зоне, которые отмечают усиление активизации оползней. Изучение и оценка параметров оползневых очагов в южной части острова Банкс показала, что в период с 1976–1999 гг. развитие оползней происходило относительно однородно, но после 1999 г. наблюдается резкий рост их активности. Отмечается два типа периодов активизации новых оползней: шквальные активизации, произошедшие в 1999, 2011, 2012 и 2013 гг., когда одновременно сходят 20–30 оползней и случайные активизации, которые отмечались в промежутках между шквальными. Они характеризуются сходом 1–2 оползней ежегодно. Уже существующий очаг растет практически ежегодно. При этом значимых корреляций в расположении оползней и их пространственной кластеризации не выявлено. С помощью кластерного анализа по параметрам суммы длины и ширины оползней мы выделили 6 классов, которые различаются в первую очередь по интенсивности и масштабу подвижек. Для исследуемой территории не было выявлено появления новых оползней с 2013 г., можно ожидать шквальной активизации в ближайшие годы.

*Ключевые слова:* оползни, высокие широты, изменение климата

DOI: 10.31857/S0205961422040042

**ВВЕДЕНИЕ**

Современные изменения климата особенно явно проявляются в высоких широтах и влекут за собой существенную активизацию экзогенных процессов. К ним относятся и оползневые процессы. Активизация оползневых процессов отмечается во многих областях Арктики.

Оползневые процессы в Арктической зоне развиваются в различных природных ситуациях. Много исследований посвящено развитию оползней на Аляске и севере Канады. А. Gibbs (2019) с соавторами показали, что скорость отступления обрывов в результате действия обвальных и оползневых процессов для Аляски во многом превышает типичные для этих широт скорости. Для пологих склонов было показано, что таяние вечной мерзлоты усиливает частоту оползней, даже на пологих склонах (Patton, Rathburn, Capps 2019). Эти оползни характеризуются высокими скоростями и большим масштабом. Для севера Канады (Kokelj et al 2017) отмечены полосы 60–100 км, где интенсивно проходят оползневые процессы из-за таяния вечной мерзлоты. Эти ландшафты состав-

ляют около 17% площади сплошной вечной мерзлоты на исследуемой территории размером 1.27 × 106 км<sup>2</sup>. Количество оползней вдоль побережья Юкона увеличилось на 73% в период с 1952 по 2011 г. (Ramage et al 2018), а общая площадь покрытия оползней увеличилась на 14%. Наибольшее увеличение наблюдалось в моренах сброса, где скорость увеличения оползней составляла 1.2 оползней в год. Многие из них полициклические, были повторно активированы в период с 1972 по 2011 г. Для Британской Колумбии было показано очевидное увеличение количества оползней за последние 15 лет (скорость в среднем 2.3 оползней в год). На оползни в горной местности сильно влияют климатические факторы, включая осадки и температуру. Для долины р. Бакингорс были показаны пространственная и временная группировка 8 крупных и некоторых более мелких оползней. Это указывает на таяние вечной мерзлоты, как причину их активизации (Geertsema et al. 2006). Для долины р. Маккензи на результатах исследования 13 оползней было показано (Wang, Paudei 2009), что существует приблизительно корреляция между скоростью регресса

разрушения и высотой стены уступа. Скорость регресса увеличивается с увеличением высоты стенки уступа. Стена уступа может отступать до 10 м/год. Оползни на склонах северной экспозиции не обязательно отступают медленнее, чем на склонах южной экспозиции.

Для острова Банкс А. Lewkowicz и R. Way (2019) описали активизацию 4000 оползней в период с 1984 по 2015 г., главным образом, после четырех особенно теплых летних периодов. Изменение цвета из-за повышенной мутности произошло в 288 озерах, пострадавших от стоков оползней и отложений, скопившихся на дне долин.

Большой вклад в изучение оползневых процессов внесли исследования на стационаре Васкины дачи (Ямал), в том числе под руководством М.О. Лейбман (2019). Исследование на ключевом оползневом цирке показало 7 циклов активизации оползней, с помощью радиоуглеродного метода был определен их приблизительный возраст — 250 г. до н.э., 210, 640, 1000, 1300, 1700 и 1989 г. н.э. Эти даты совпадают с годами с теплым летом. Периоды активизации разделяются периодами относительно стабильности продолжительностью 290–460 лет, необходимыми для восстановления напряженного состояния склонов и условий местности, благоприятных для оползневого процесса. Древним оползням с полностью восстановленным растительным покровом, вероятно, не менее 300 лет, а некоторые образовались не менее 2000 лет назад.

Еще в 2000 г. группой под руководством М.О. Лейбман была сформулирована концепция поэтапной переработки рельефа равнин Арктики. Рассмотрены два главных этапа преобразования склонов: первый обусловлен голоценовым потеплением, на этом этапе закладывались термоцирки по пластовым льдам. Второй этап наступает с затуханием первого — склоны развиваются в зависимости от колебаний климата, литологического и химического состава пород. Ландшафтно-климатический цикл составляет примерно 350 лет. Локальные условия, вероятно, возникают чаще и реализуются в виде отдельных оползней, о чем свидетельствует существование 9–23 летнего цикла.

Для термоцирков на бортах термокарстовых озер центральной Якутии было показано (Séjourné et al 2015), что на южных склонах термокарстовых озер таяние вечной мерзлоты приводит к регрессивному таянию, которое формирует термоцирки. Абляция льда активно их поддерживает с отступом 0.5–3.16 м/год. Развитие и статистическое распределение термоцирков, а также деградированных полигональных байджарахов подтверждают мнение о том, что текущее развитие термокарста в основном контролируется инсоляцией на берегах термокарстовых озер. Вероятностную модель развития оползневых процессов разработал А. Викторов (2015), в рамках которой

показал наличие стабильного пространственно-временного распределения статуса оползней в пределах однородной территории.

Активно изучаются криогенные оползни и в горных районах Китая. Для одного из регионов Тибетского нагорья (Luo et al. 2019) анализ спутниковых снимков выявил, что в период с 2008 по 2017 г. общее число оползней увеличилось на 253%, а общая площадь поверхности увеличилась на 617%. Значительное увеличение оползней пришлось на 2010 и 2016 годы, что связано с аномально высокой температурой воздуха и большим количеством осадков в эти года. Для другого региона на 15 участках было показано (Mu et.al. 2020), что большинство оттепелей было полициклическими, имело начальную фазу развития, фазу активного развития и фазу реактивного развития, на которые влияли геоморфологические и почвенные условия. Средние темпы роста оползней прогрессивно увеличивались, был зафиксирован быстрый рост оттаивания вечной мерзлоты. F. Niu et al. (2015) для участка Тибета показали, что распределение оползней обусловлено наличием вечной мерзлоты, уклонами от 6 до 10° и среднегодовой температурой, превышающей –0.5°C. Оползни классифицируются как регрессивные оползания из-за оттаивания верхней стенки. Было показано, что активизация оползней может быть вызвано тремя факторами: высокие температуры в летний период, большое количество осадков, которое может вызвать подъем грунтовых вод до уровня 1.42 м, сейсмическая активность.

Как показывает обзор ситуации с развитием оползней в мире, практически по всех областях, где проходит изучение оползневых криогенных процессов, фиксируется их значительная активизация. Именно для зоны высоких широт, а также высокогорных условий характерна очень чуткая реакция на современные процессы изменения климата. Системы этих регионов находятся в относительно неустойчивом состоянии и минимальные изменения климатических, а за ними и грунтовых условий приводят к существенной активизации криогенных процессов.

Несмотря на то, что оползневые процессы в арктической зоне изучаются очень активно, измерению конкретных параметров развития оползней уделяется недостаточно внимания.

Целью этой работы является анализ активизации оползневых очагов в пределах острова Банкс (Канада) и оценка динамических параметров активизации.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для измерения параметров активизации оползневых очагов был выбран небольшой участок острова Банкс (Канада) с большим количеством очагов оползневых процессов (рис 1). Оползневые



Рис. 1. Исследуемая территория на снимке острова Банкс.

процессы этого острова были предварительно выделены в работе А. Lewkowicz и R. Way (2019), но их описание и измерение были сделаны бегло. Для установления характеристик активизации требуются дополнительные измерения.

Остров Банкс имеет площадь около 70 тыс. км<sup>2</sup>, является самым западным островом Канадского Арктического архипелага. На западе омывается морем Бофорта, на севере отделен от островов Принс-Патрик и Мелвилл проливом Мак-Клур, на востоке от острова Виктория проливом Принца Уэльского и от материковой Канады на юге заливом Амундсена.

Рельеф острова разнообразен, варьируется от сильно расчлененного нагорного плато на севере, низменных, покрытых ледниковыми отложениями слабохолмистых территорий в центральной

части и моренных холмов, и скальных нагорий на юге (Belliveau, 2007).

Остров Банкс полностью находится в зоне сплошной вечной мерзлоты, в которой содержание грунтового льда меняется от высокого до среднего, а мощность может превышать 500 м. Остров располагается в двух природных зонах — полярной тундры и прибрежной арктической тундры, климат арктический. Среднегодовая температура воздуха в юго-западной части острова составляет  $-12.8^{\circ}\text{C}$ , а годовое количество осадков около 150 мм, из которых 65% приходится на снег (А. Lewkowicz, R. Way, 2019).

Исследуемая территория располагается в южной части острова (рис. 1).

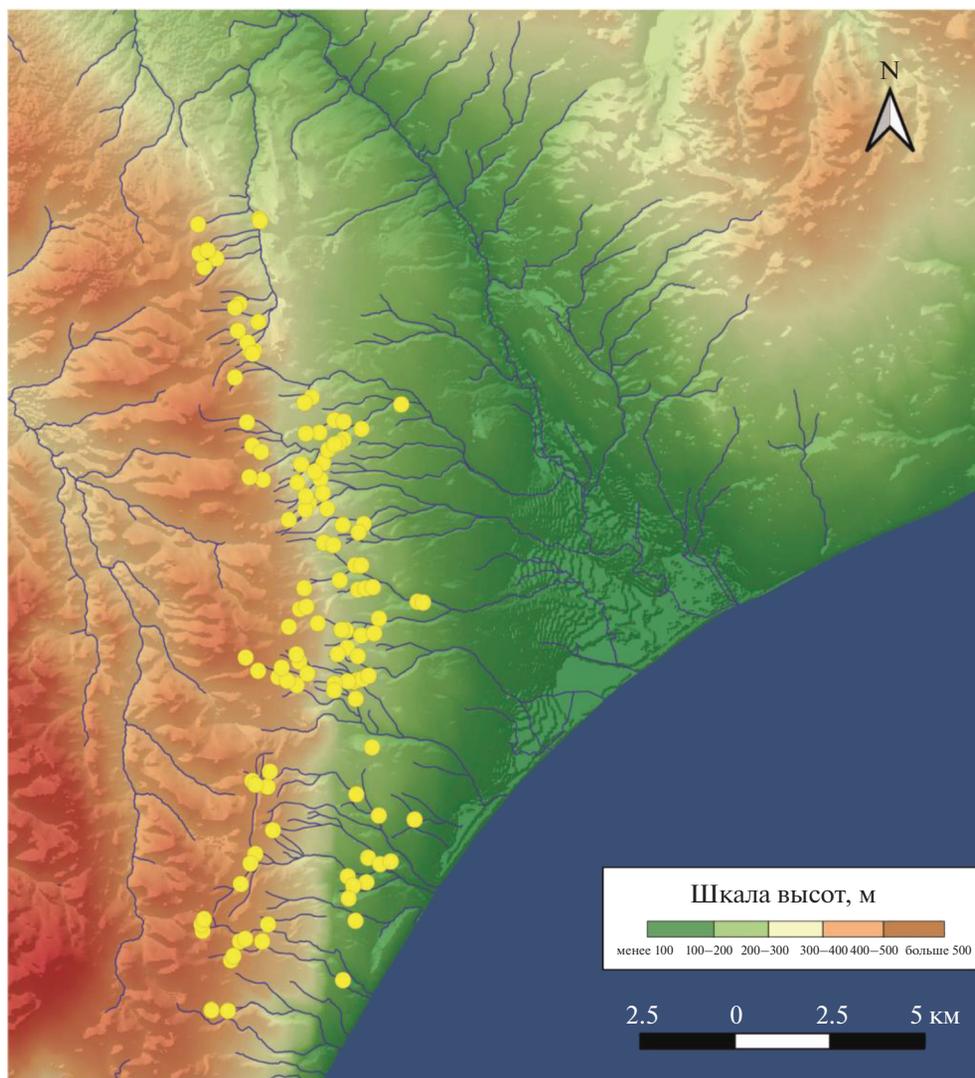


Рис. 2. Положение оползней в долине реки Нельсон.

Территория представляет собой обширную долину реки Нельсон протяженностью около 30 км, берущей свое начало на моренном плато и впадающей в залив Амундсена. Долина реки с юго-западной стороны врезана в крутые утесы Нельсон-Хед (высота 425 м), сложенные докембрийскими породами, с юго-восточной части в утесы, сложенные желтыми, белыми и красными кварцитами.

Из имеющейся базы данных оползней острова Банкс (Lewkowicz, Way 2019) были выбраны оползни, зафиксированные на относительно однородной по ландшафтным и геоморфологическим признакам территории – вдоль правого крутого, местами обрывистого и высокого (от 300 до 500 м) борта речной долины, изрезанного многочисленными водотоками, впадающими в основную реку Нельсон. Крутизна склонов, в пределах которых выявлены оползни составляет 2–11°.

Для исследования закономерностей развития оползневого процесса на острове было отобрано 119 оползней, которые в большей степени приурочены к склонам водотоков и оврагов (тип R), либо, в меньшей степени, зафиксированы вдали от них (тип S) (рис. 3).

У каждого выбранного оползня за каждый год были измерены следующие параметры:

1. Длина от подошвы склона до бровки срыва ( $d_1$ ).
2. Длина от линии тальвега до бровки срыва ( $d_2$ ).
3. Длина от подошвы склона до линии водораздела (условная линия, проходящая между двумя соседними водотоками) ( $d_3$ ).
4. Ширина оползня ( $w$ ).

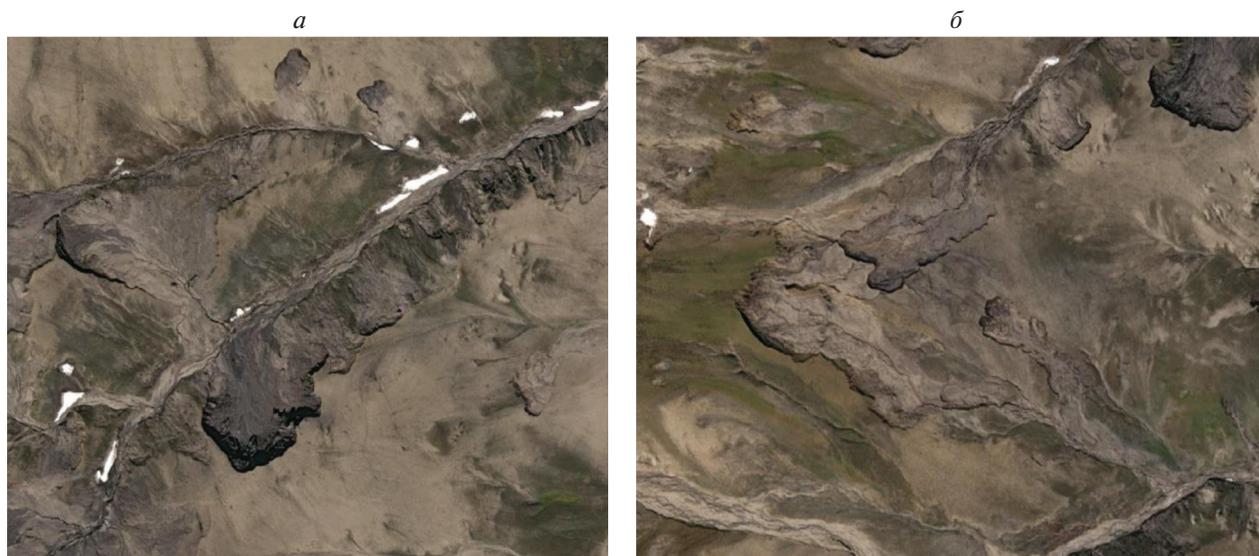


Рис. 3. Оползни на снимке: *а* – тип R, *б* – Тип S.

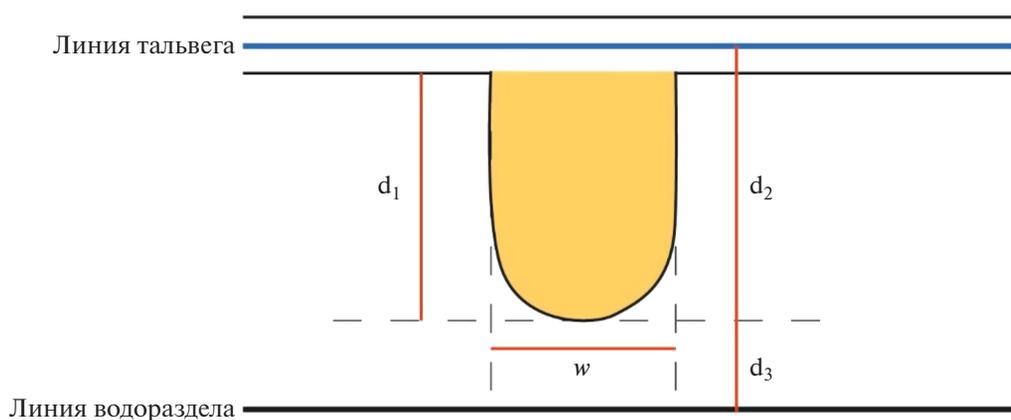


Рис. 4. Измеряемые параметры оползня.

Схема измеряемых параметров показана на рис. 4. Выбор параметров был связан как с их значимостью при характеристике оползня, так и с возможностью их достаточно точного определения по используемым данным – имеющимся материалам дистанционного зондирования.

Измерение параметров (в метрах) производилось в программе QGIS.

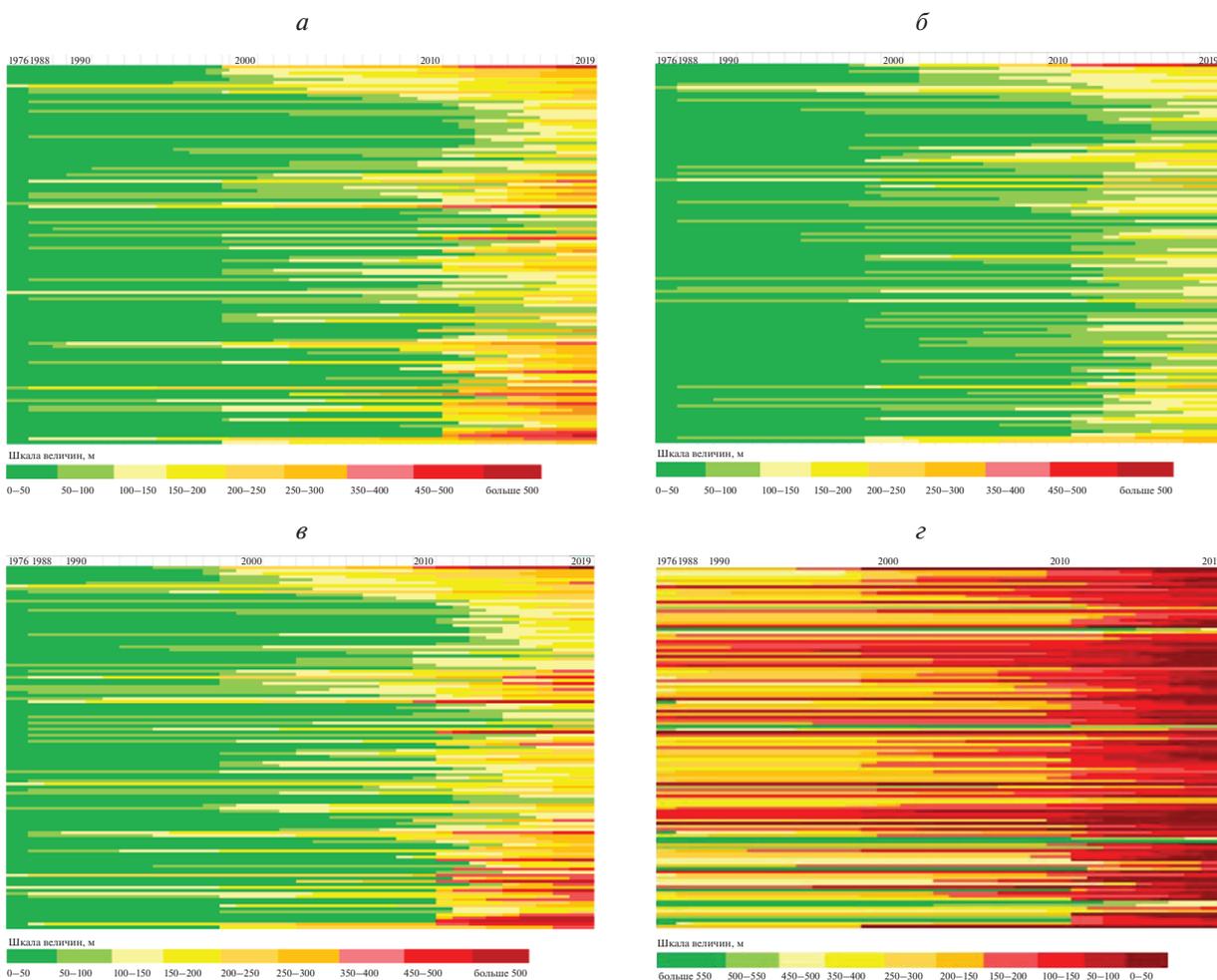
Для измерения были подобраны космические снимки за 1988–2019 гг., кроме того, были использованы снимки Corona за 1976 г. Таким образом, временные интервалы были покрыты следующими типами спутниковых снимков:

- 1976 г. Corona (12 м/пикс)
- 1988–1999 гг. Landsat-5 TM (30 м/пикс)
- 1999–2013 гг. Landsat 7 (15 м/пикс)
- 2013–2015 гг. Landsat 8 (15 м/пикс)

- 2019 г. WorldView-2 (0.5 м/пикс)
- 2015–2019 гг. Sentinel 2 (10 м/пикс)

В качестве опорного материала выступал снимок WorldView-2 (0.5 м/пикс) от 3 августа 2019 г., представленный в покрытии ESRI Satellite (ArcGis World Imagery).

Использованные космические снимки позволяют измерить приведенный ряд параметров за весь временной интервал исследования (43 г.) с достаточной точностью. Погрешность измерений соответствует разрешению использованных снимков и является разной для разных периодов. Для периода 1999–2013 она может быть оценена как 15–20 м, для периода 1999–2015 как 7.5–10.5 м, для периода 2015–2020 как 5–7.5 м. Погрешность уменьшается во времени, так как увеличивается качество использованных снимков. Использование опорного высокдетального снимка в 2019 г.



**Рис. 5.** Изменение параметров оползней во времени с накоплением: *а* – длин оползней вдоль по склону, *б* – ширины оползней поперек склона, *в* – расстояния от тальвега, *г* – расстояния до водораздела. Каждая отдельная горизонтальная полоска на графике соответствует оползневому очагу.

позволяет дополнительно верифицировать проведенные измерения.

Также, помимо космических снимков, была использована цифровая модель рельефа Artic DEM (2 м/пикс), с помощью которой был проведен анализ поверхности исследуемого участка и измерены характеристики рельефа. Для мультиспектральной съемки использовался метод паншарпенинга для улучшения свойств визуального дешифрирования снимка.

В качестве вспомогательных ресурсов для визуального анализа изменений поверхности земли использовались такие продукты, как Google Earth Engine Timelapse и Google Earth Pro. Наборы данных представляют собой серию ежегодных снимков земной поверхности различными спутниками с 1984 по 2018 г., которые представлены в качестве масштабируемого видеоряда. Подобный способ предоставления информации позволил отследить появление новых случаев активизаций, а также

более точно оценить и рассмотреть движение грунтов там, где это было затруднительно на отдельных снимках из-за невысокого разрешения, облачности и снежного покрова.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Каждый параметр анализировался отдельно и был получен характер распределения параметра во времени (рис. 5).

На рис. 5, *а–в* приведено изменение параметров оползней во времени с накоплением. На рис. 5, *а* показано увеличение с накоплением длины оползня вдоль склона (параметр  $d_1$ , рис. 4), 5, *б* ширины оползня поперек склона (параметр  $w$ , рис. 4), 5, *в* расстояние от уступа до тальвега водотока (параметр  $d_2$ , рис. 4), 5, *г* расстояние от уступа до водораздела (параметр  $d_3$ , рис. 4). Каждая строка в диаграмме соответствует одному оползню, слева направо показано изменение во времени. Цветом

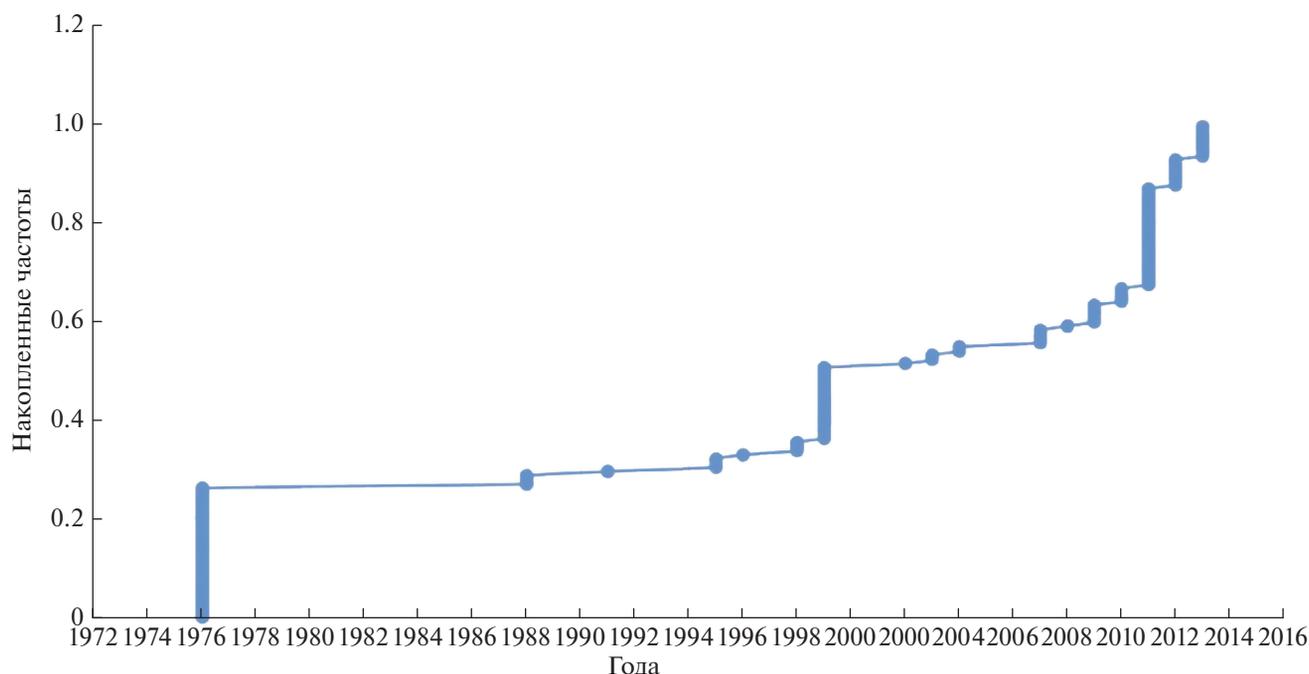


Рис. 6. График накопленного распределения времени возникновения новых оползней.

показано изменение значения соответствующего параметра.

Максимальная длина вдоль по склону оползневой очага зарегистрированная на выборке, составила 480 м, ширина 409 м. Оползень такого рода возникает на склоне в начале наблюдений и его характеристики увеличиваются в процессе наблюдений и достигают в максимальных значениях 480 м вдоль по склону, и 409 м поперек склона. Минимальная длина вдоль по склону оползневой очага зарегистрированная на выборке составила 54 м, ширина 40 м.

Для всех оползней характерно похожее поведение — довольно стабильный период в 1976–1999 гг., а далее резкий рост размеров. Как видно из рис. 5, оползни обладают различным поведением: встречаются оползни, которые активизируются постоянно (желтые оттенки для всех временных интервалов), стабильные до 1999 г. оползни, стабильные до 2011 г. оползни. Встречаются и другие случаи.

Была проанализирована зависимость частоты возникновения новых оползней в течение года (рис. 6). Под возникновением новых оползней понимались случаи, когда ранее стабильный склон оказался затронут оползневым процессом в первый раз за период наблюдений.

На графике за полное количество — “1” взято суммарное количество появления новых оползней за весь период, для каждого года откладывается доля возникших новых оползней. Начало наблюдений было в 1976 г., соответственно, все

оползни, зарегистрированные в 1976 показаны на этом графике как “новые”. Наблюдения с 1976 до 1988 г. отсутствуют из-за отсутствия съемки, поэтому полноценно интерпретировать график можно только с 1988 г.

На графике хорошо видны “шквальные” события, когда за один год количество возникновения новых оползней резко возрастает. На графике видно, что возникновение новых зарегистрировалось вплоть до 2013 г.

Можно говорить, что выявляется два типа периодов возникновения новых оползней:

1. Шквальная активизация, которая была отмечена в 1999, 2011 гг. и в 2012, и в меньшей степени 2013 г.
2. Случайная активизация, которая регистрировалась в промежутках между периодами шквальной активизации.

Для шквальной активизации характерно одновременное ежегодное появление 20–30 оползней. Для случайной активизации характерен сход 1–2 новых оползней ежегодно. В случае активизации оползневой очаг может увеличиться до 100 м вдоль по склону, и до 50 м поперек склона.

Всего за 55 лет наблюдений была зафиксирована активизация 87 новых оползневых очагов, не активных в 1976 г. При этом 40 из них активизировались за период 1976–2012 г., остальные 47 за оставшийся 7 летний период.

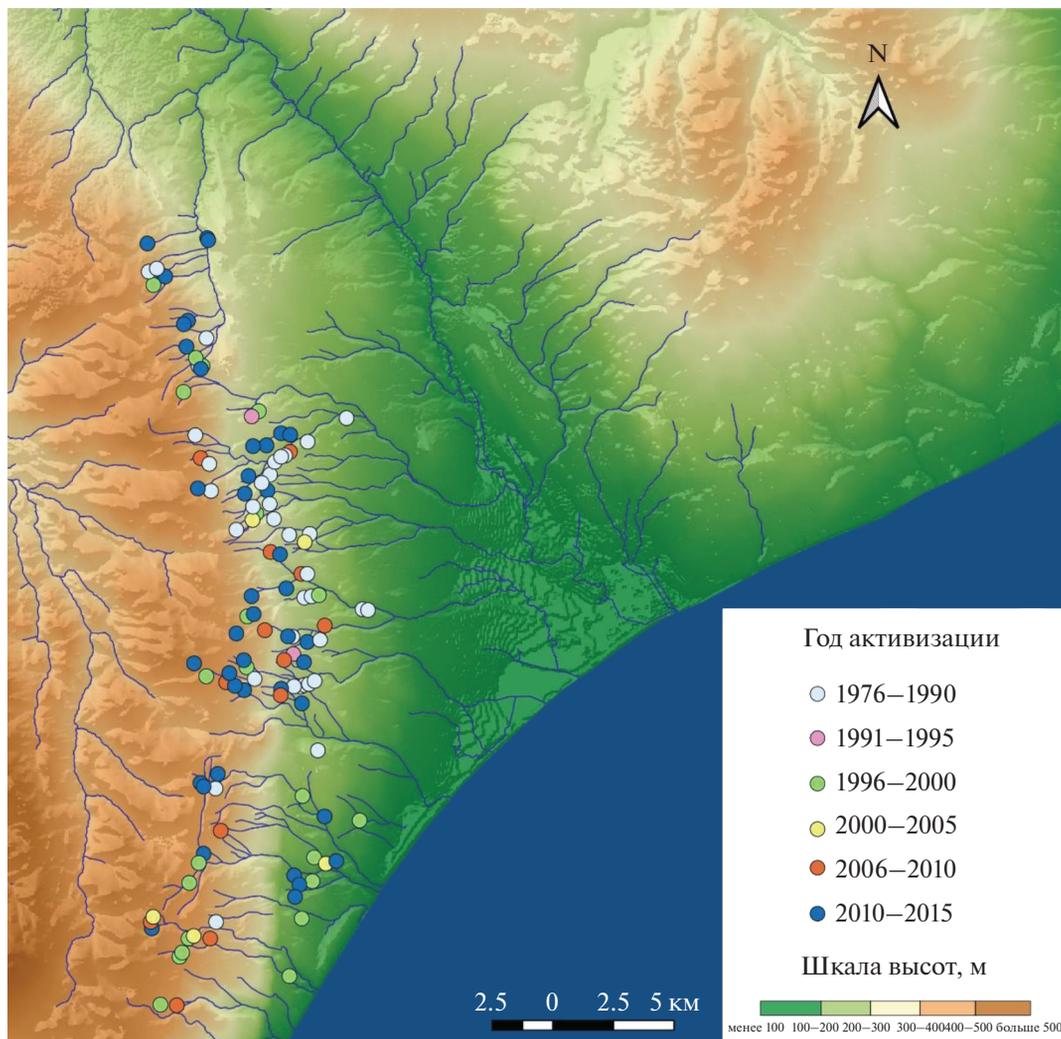


Рис. 7. Карта новых активизаций по годам.

Стоит отметить, что в период 2013–2019 гг. активизация новых оползней не отмечена, но оползни, выделенные ранее, продолжали смещаться.

На рис. 7 приведена карта распределения новых активизаций на исследуемом участке.

В целом, можно заключить, что оползни не образуют явных скоплений, приуроченности к прямым линиям и т.д., разумеется, это не означает, что на активизацию оползневой процесс не действуют локальные факторы (локальная крутизна, отсутствие дренажа и др.).

На рис. 8 представлено накопленное распределение смещений для оползней, которые были выявлены в первый срок наблюдений, а также для тех, у которых были отмечены первые активизации в период шквальных активизаций 1999 и 2011 гг.

В качестве примера рассмотрим оползни с первой активизацией в 1999 и 2011 гг. График на рис. 8 показывает, что до первой активизации участок склона находится в стабильном состоя-

нии. После того, как активизируется оползневой процесс и происходит первая активизация, оползень начинает ежегодно испытывать подвижки. И далее участок склона, вовлеченный в оползневой процесс, продолжает испытывать подвижки, вплоть до конца срока наблюдений.

Для выявления закономерностей динамики оползней была сделана классификация поведения оползней во времени.

Для разбиения оползней на классы по их изменению во времени был использован кластерный анализ. В качестве параметра, описывающего поведение оползня во времени, была выбрана сумма изменения длины и ширины оползня за год (изменение плановых размеров), в качестве меры сходства использован коэффициент корреляции. Было установлено, что выборка разбивается на 6 классов. Характер изменения плановых размеров получившихся классов оползней по годам приведен на рис. 9.

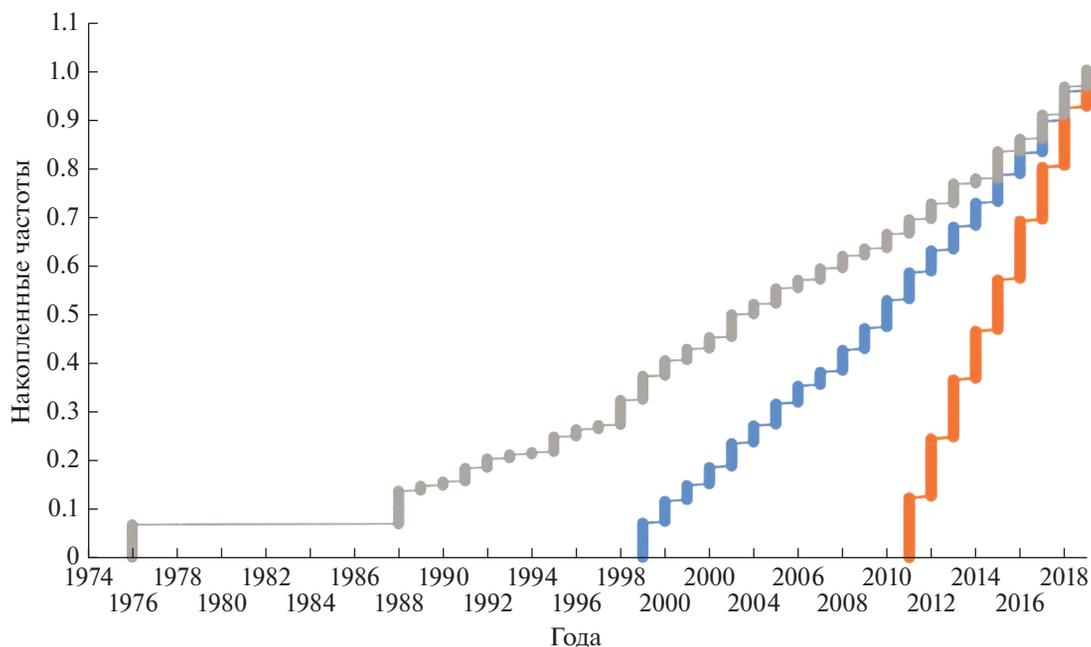


Рис. 8. График накопленного распределения смещений для оползней, выявленных в 1976 г., 1999, 2011 гг.

Для класса 1 характерны оползни с небольшим изменением плановых размеров (не более 20 м) во время активизаций оползней. Активизация зафиксирована в следующие периоды: 1999–2002, 2012–2013, 2016–2019. Отличие этого класса от других – небольшие изменения плановых размеров, за исключением стартовых годов. С 2010 по 2011 большинство оползней этого класса не изменяет своих плановых размеров, т.е. находится в состоянии покоя в отличии от оползней других классов. Для класса 2 характерны оползни со средним изменением плановых размеров (до 40 м) во время активизации. Общие годы активизации оползней данного класса 1999, 2003, 2011–2013, 2015–2016, 2018–2019. В отличии от других классов оползни этого класса довольно сильно изменяют плановые размеры с 2011 по 2012, и наоборот, с 2016 по 2017 практически не меняют своих плановых характеристик. Для класса 3 характерны оползни с большими изменениями плановых размеров во время активизации. Общие годы активизаций – 1995, 1999, 2002, 2011, 2015–2019. В отличие от большинства других классов эти оползни изменяли свои плановые размеры с 1994 по 1995 и с 2001 по 2002, когда большинство других оползней было относительно стабильно, также для этого класса оползней характерно сильное изменение размеров с 1998 по 1999 г. Для класса 4 характерны оползни с сильным изменением плановых размеров с 1998 по 1999 и с 2010 по 2011 гг. Это отличает их от других классов. Также для них отмечено изменение плановых размеров с 2006 по 2007, в то время как другие оползни оставались стабильными в это время. Общие годы активиза-

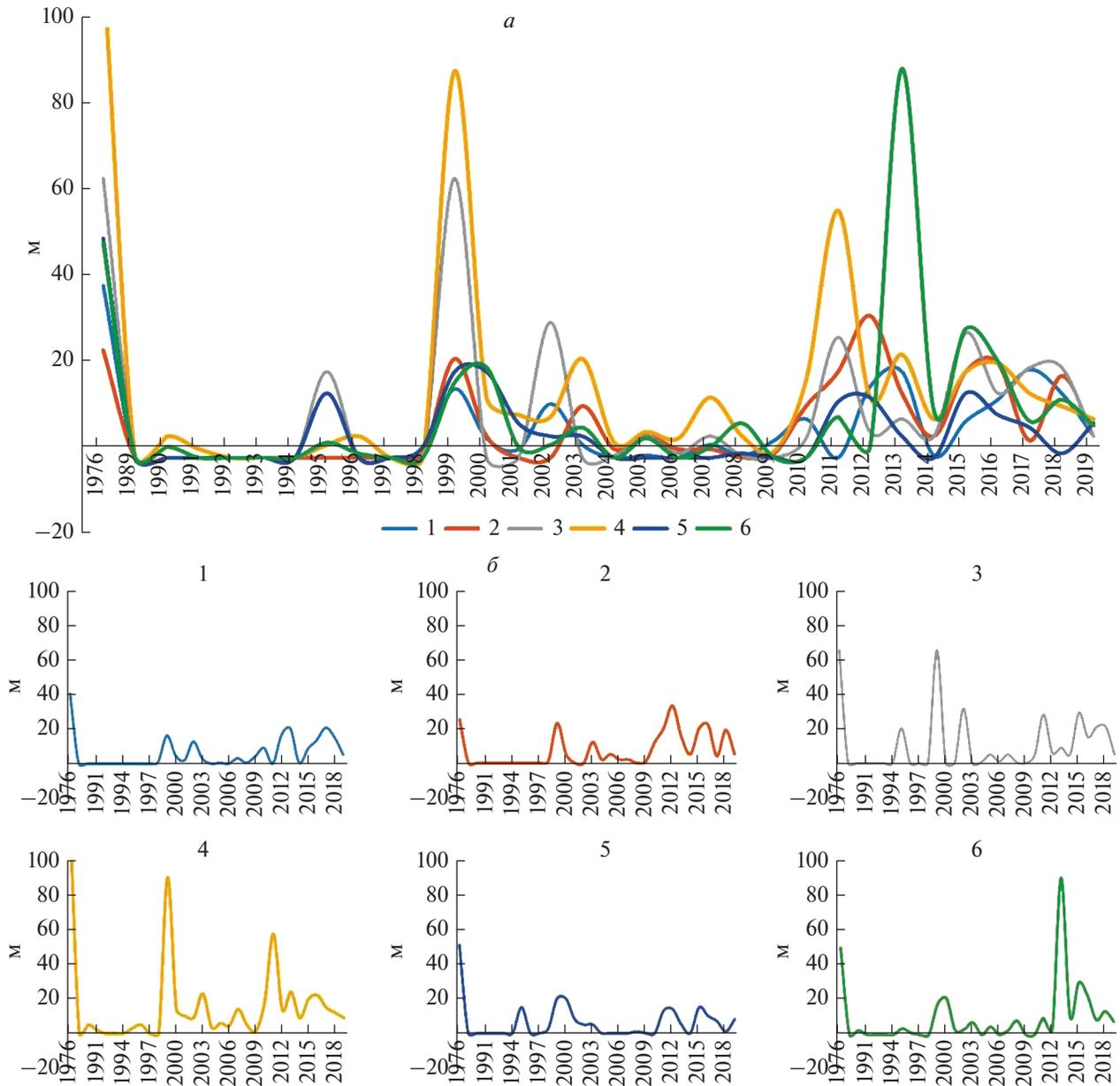
ции, кроме указанных выше, 2003, 2013 и 2015–2016 гг. Для класса 5 характерны оползни с небольшим (до 20 м) изменением плановых размеров. Годы, когда оползни меняли свои размеры, это 1995, 1998–2003, 2011–2013, 2015–2017. От других оползней они отличаются изменением плановых размеров с 1994 по 1995 г., а также с 1998 по 2000 г. Для класса 6 характерны оползни со значительным (до 80 метров) изменением плановых размеров с 2012 по 2013 и с 2014 по 2015 г., в другие годы эти оползни остаются относительно стабильными.

Изменение значений параметра (суммы длины и ширины) приведены в табл. 1.

В табл. 1 плановые размеры даны в метрах и округлены до десятков; розовым цветом помечены годы, когда почти все оползни меняют свои размеры, а голубым годы, когда большинство оползней остается в стабильном состоянии.

На рис. 10 приведено пространственное распределение классов оползней на территории.

Был проведен пространственный анализ характера распределения классов оползней по территории (рис. 10). Для этого рассчитана встречаемость оползней каждого класса вокруг километровой окрестности ста случайных точек. Для этого в пределах изучаемого участка были расположены сто точек случайным образом, вокруг каждой точки нарисован круговой полигон радиусом 1 км. Для каждого полигона рассчитано количество оползней разных классов, попавших внутрь полигона). Далее рассчитана корреляция



**Рис. 9.** Классы оползней по изменению плановых характеристик за 30 лет (для каждого класса взята медиана значений): по вертикальной оси показано измерение плановых размеров в метрах, по горизонтальной оси годы. *a* – все классы, *б* – каждый класс отдельно.

между встречаемостью оползней разных классов (табл. 2)

Как видно из таблицы и рисунка, расположение по территории оползней, характеризующихся разным поведением во времени (относящихся к разным классам), не имеет какой-либо пространственной приуроченности, поскольку значимых корреляций в расположении разных классов и их пространственной кластеризации не выявлено.

Также был проведен анализ возможной связи выделенных классов и крутизн склонов, на кото-

рых расположены оползни. Крутизна склона, на котором располагаются оползни, определялась по модели ArcticDem (рис. 11).

Различия классов по величине крутизны склона проверялись с помощью критерия Смирнова (Смирнов Н.В., 1939). Большая часть всех оползней расположена на пологих склонах (по Рычагов Г.И., 2006), но во всех классах представлены оползни, расположенные на очень пологих склонах, в некоторых классах отдельные оползни расположены на склонах средней крутизны. Значимых свя-

**Таблица 1.** Средние значения изменения плановых размеров (м) оползней разных классов по годам

Год	Классы					
	1	2	3	4	5	6
1988	50	30	70	110	70	40
1989–1994						
1995			20	10	20	
1996				10	10	
1999	10	30	70	90	20	10
2000	10	10		10	30	10
2001				10	10	
2002			30	10	10	
2003		10		20	10	
2004–2006						
2007				10		
2008–2009						
2010	10	10		20		
2011	10	20	30	60	10	
2012	10	40		10	20	
2013	20	10	10	20		90
2014			10	10		10
2015	10	20	30	20	10	30
2016	20	20	20	20	10	20
2017	30		20	20	10	10
2018	20	20	20	10		10
2019				10		10

зей не выявлено класса оползня с крутизной не было выявлено.

### ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках работы было показано, что сочетание набора космической съемки, состоящего из снимков Corona, Landsat 5, 7, 8, Sentinel 2A, позволяет выстроить временной ряд анализа оползневых процессов длительностью около 50 лет. Использование опорного высокодетального снимка, а также цифровой модели рельефа позволяет уточнить и верифицировать измерения, полученные на основе съемки среднего разрешения.

В результате анализа данного временного ряда были получены новые закономерности различных аспектов проявления оползневых процессов в пределах выбранного участка о. Банкс.

Было установлено, что изучаемый участок был слабо затронут оползневым процессом в начале наблюдений. В 1976 г. было выделено 42 оползневых очага, к 2019 г. их число увеличилось до 119. Была проанализирована частота активизаций новых очагов проявления оползневых процессов. Большую часть времени наблюдается случайный

процесс активизации (появления) новых оползней, при почти повсеместной шквальной активизации в определенные узкие периоды. Однако периоды между шквальными оптимизациями постоянно сокращаются. Новые очаги явно имеют тенденцию к увеличению частоты появления в период 1976–2013 гг. Однако в период 2013–2019 гг. (год окончания наблюдений) для исследуемой территории не было выявлено появления новых очагов. Можно предположить, что в скором времени возможна шквальная активизация. В то же время возможно причина прекращения возникновения новых оползневых очагов заключается в

**Таблица 2.** Корреляция встречаемости оползней разных классов

Классы	2	3	4	5	6
1	0.25	–0.06	0.06	–0.24	–0.08
2		0.11	0.19	0.04	0.35
3			0.41	0.01	0.29
4				0.30	0.36
5					0.27

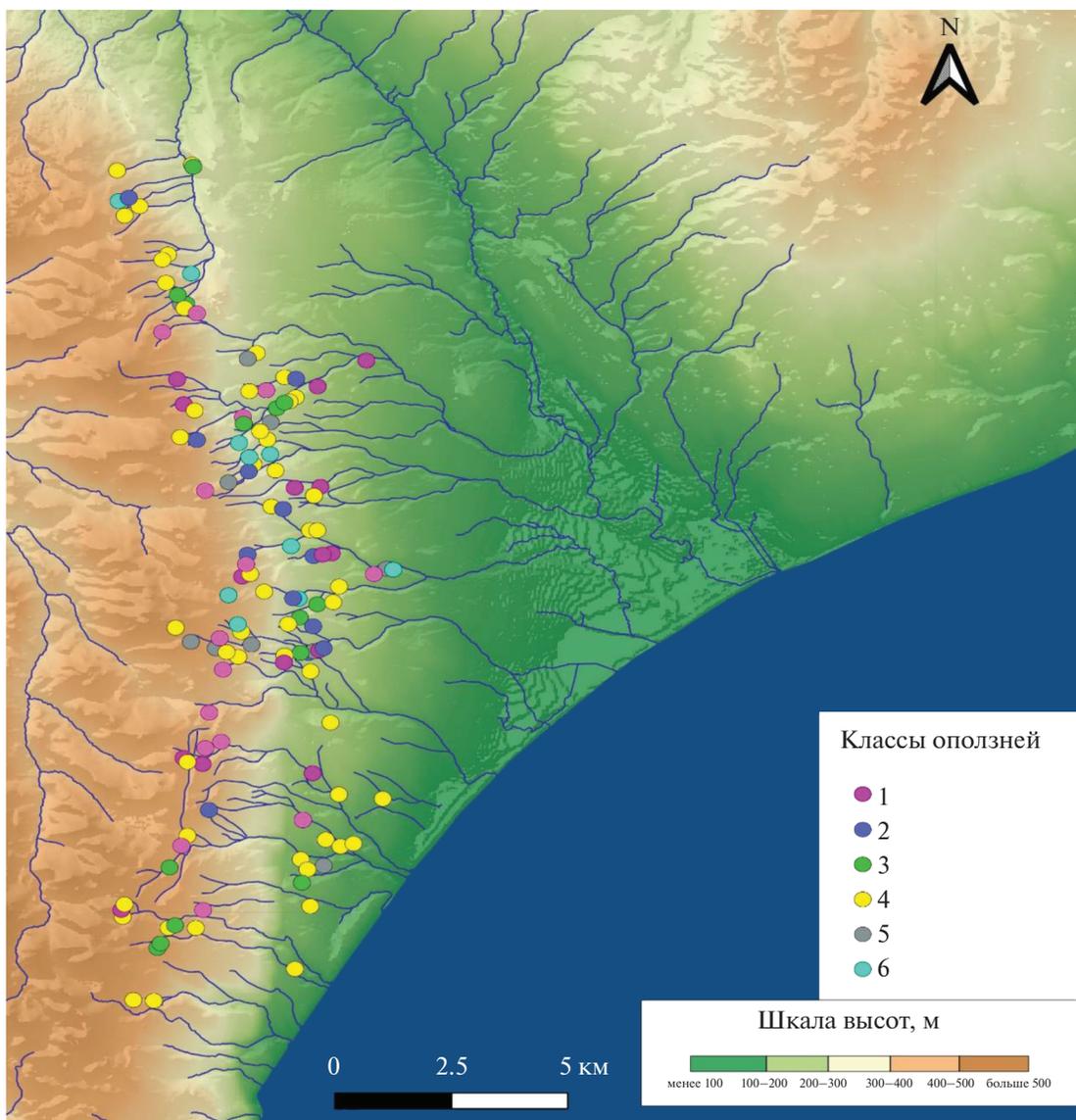


Рис. 10. Пространственное распределение оползней по классам.

том, что на исследуемом участке большинство свободных участков для их возникновения уже заняты. Таким образом, следует продолжить наблюдения за частотой активизаций оползней на острове Банкс.

В рамках проведенного исследования были измерены линейные параметры очагов, такие как длина оползня вдоль склона, ширина оползня поперек склона, расстояние уступа до тальвега, расстояние уступа до водораздела за каждый год наблюдений. Было показано, что после своего появления на склоне оползневой очаг увеличивает свои размеры практически ежегодно и остается активным с момента появления до окончания наблюдений. При этом отдельные очаги могут уве-

личиться за период наблюдения до 480 м вдоль по склону, 410 м поперек склона.

Было выдвинуто предположение, что внутри общей выборки можно выделить группы оползней, объединенных по частоте активизации и увеличению размеров. С помощью кластерного анализа были проанализированы группировки оползней. Всего достоверно можно различить 6 классов для отобранной выборки (рис. 9, табл. 1). Каждый класс обладает своими свойствами поведения, частотой и размерами активизаций.

Безусловно, оползневые процессы имеют локальную приуроченность к склонам определенной формы и с определенными геологическими условиями, однако, данное исследование показало, что в пределах относительно однородных тер-

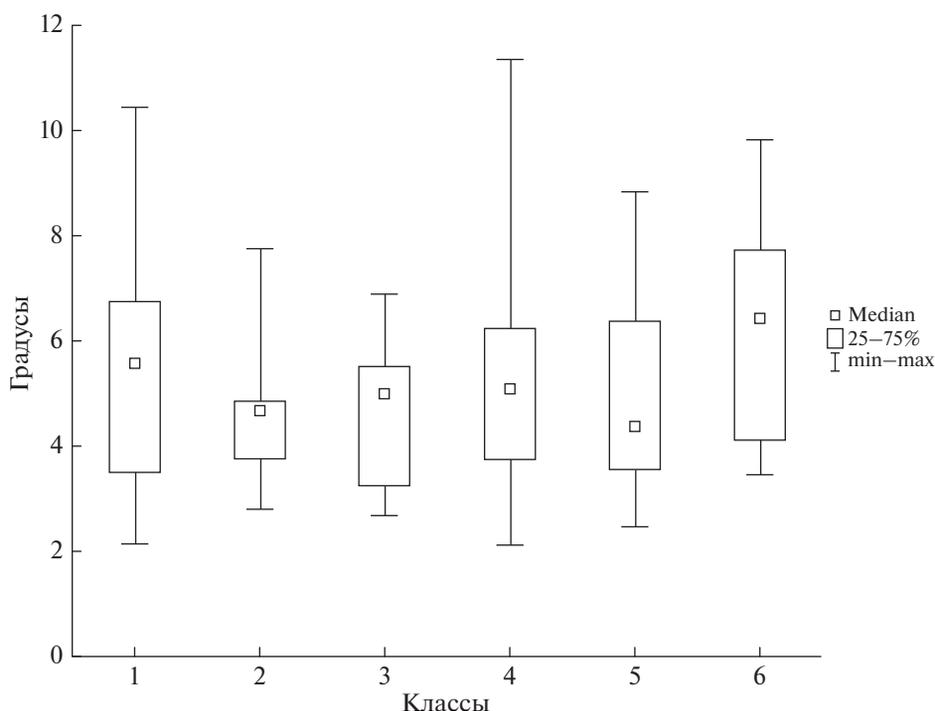


Рис. 11. Распределение классов оползней по склонам различной крутизны.

риторий процессы не имеют явной пространственной приуроченности к линиям. Они также не группируются в скопления и подчинены локальным факторам, которые обуславливают более или менее независимое размещение оползней. Этот факт может стать основой для вероятностного моделирования.

Вероятностное моделирование, в сочетании с интерпретацией дистанционных съемок является практически единственным методом выявления новых закономерностей для таких удаленных, сложно достижимых регионах, как о. Банкс и некоторые районы Российской Арктики.

Результаты, полученные для частоты появления новых очагов и для увеличения уже существующих, в целом хорошо согласуются с литературными источниками. Они коррелируют со многими исследованиями, отражающими активизацию оползневых процессов в криолиотозоне в разных регионах мира (Аляска, Ямал, Канада, Китай и др.). Также они подтверждают и расширяют исследования, уже проведенные по дистанционным данным для о. Банкс (A. Lewkowicz, R. Way, 2019).

## ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволяет установить новые закономерности развития оползневых процессов в криолиотозоне и сделать следующие выводы:

– Использование многолетнего набора космической съемки, в первую очередь, снимков Сого-

на 60–70-х гг., временного ряда снимков Landsat-Sentinel, опорных высокоточных снимков Maxar, Airbus, Роскосмос позволяет получать достаточно подробную информацию о происходящих процессах.

– Всего за 55 лет наблюдений была зафиксирована активизация 87 новых оползневых очагов, не активных в 1976 г. При этом 40 из них активизировались за период 1976–2012 г., остальные 47 за оставшийся 7-летний период.

– Шквальные активизации были отмечены в 1999, 2011 гг., 2012, и в меньшей степени для 2013 г.

– Случайные активизации регистрировались в промежутках между периодами шквальных активизаций.

Для шквальной активизации характерен одновременный ежегодный сход 20–30 новых оползней. Для случайной активизации характерен сход 1–2 новых оползней ежегодно.

– В случае активизации уже существующий оползневой очаг может увеличиться до 100 м вдоль по склону, и до 50 м поперек склона за год.

– Отмечается нарастание частоты появления новых оползней во времени в период 1976–2013, однако после 2013 г. и до конца наблюдений (2019 г.) появления новых очагов не отмечено.

– До первой активизации участок склона находится в стабильном состоянии. После того, как активизируется оползневой процесс и происхо-

дит первая активизация, оползень начинает ежегодно испытывать подвижки.

– Распределение оползней не имеет пространственной приуроченности. В частности, не отмечается пространственной приуроченности к линиям, оползни не группируются в скопления и подчинены локальным факторам, которые обуславливают независимое размещение оползней.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-17-00226).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лейбман М.О., Кизяков А.И., Арчегова И.Б., Горланова Л.А.* Этапы развития криогенного оползания на Югорском полуострове и Ямале // Криосфера Земли. 2000. Т. IV. С. 67–75.
- Лейбман М.О., Хомутов А.В.* Стационар “Васькины да-чи” на Центральном Ямале: 30 лет исследований // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. 1. С. 91–95.
- Рычагов Г.И.* Общая геоморфология: учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. / Г.И. Рычагов. М.: Изд-во Моск. ун-та: Наука, 2006. 416 с.
- Смирнов Н.В.* Оценка расхождения между эмпирическими кривыми распределения в двух независимых выборках // Бюллетень МГУ, серия А. 1939. Т. 2. № 2. С. 3–14.
- Belliveau D.K.* Coastal geomorphology of southwest Banks Island, NWT: historical and recent shoreline changes and implications for the future // Masters thesis, Faculty of Science Memorial University of Newfoundland. 2007. P. 8–18.
- Baolin W., Bhuwani P., Haoqiang L.* Landslide of the Mackenzie valley and adjacent mountainous and coastal regions // Landslides. 2009. 6: 121–127. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0150-y>
- Costard S.F., Fedorov A., Gargani J., Skorve J., Massé M., Mège D.* Evolution of the banks of thermokarst lakes in Central Yakutia (Central Siberia) due to retrogressive thaw slump activity controlled by insolation // Geomorphology. 2015. Т. 241. С. 31–40.
- Fujun Niu, Jing Luo, Zhanju Lin, Jianhong Fang, Minghao Liu.* Thaw-induced slope failures and stability analyses in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau, China // Landslides. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0545-2>
- Geertsema M., Clague J.J., Schwab J.W., Evans S.G.* An overview of recent large catastrophic landslides in northern British Columbia, Canada // Engineering Geology 83. 2006. 120–143. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.06.028>
- Gibbs A.E., Nolan M., Richmond B.M., Snyder A.G., Erikson L.H.* Assessing patterns of annual change to permafrost

bluffs along the North Slope coast of Alaska using high-resolution imagery and elevation models // Geomorphology. 2019. V. 336. P. 152–164.

*Jing Luo, Fujun Niu, Zhanju Lin, Minghao Liu, Guoan Yin.* Recent acceleration of thaw slumping in permafrost terrain of Qinghai-Tibet Plateau: An example from the Beiluhe Region // Geomorphology. 2019. V. 341. P. 79–85.

*Kokelj S. V., Lantz T. C., Tunnicliffe J., Segal R., Lacelle D.* Climate-driven thaw of permafrost preserved glacial landscapes, northwestern Canada // GEOLOGY. 2017. V. 45. 4. P. 371–374.

<https://doi.org/10.1130/G38626.1>

*Lewkowicz A.G., Way R.G.* Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a High Arctic environment // Nature Communication. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09314-7>

*Leibman M., Khomutov A., Kizyakov A.* Cryogenic Landslides in the West-Siberian Plain of Russia: Classification, Mechanisms, and Landforms. In book: Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change, Environmental Science and Engineering. P. 143–162. Publisher: Springer International Publishing, Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-00867-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00867-7_11)

*Mu Cuicui, Shang, Jianguo Zhang, Tingjun Fan, Chengyan Shufa, Wang Peng, Xiaoqing Zhong, Wen Feng, Zhang Mei, Mu Jia, Lin.* Acceleration of thaw slump during 1997–2017 in the Qilian Mountains of the northern Qinghai-Tibetan plateau. Landslides. 2020. 17. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01344-3>

*Patton A.I., Rathburn S.L., Capps D.M.* Landslide response to climate change in permafrost regions // Geomorphology. 2019. V. 340. P. 116–128.

*Porter Claire, Morin Paul, Howat Ian, Noh Myoung-Jon, Bates Brian, Peterman Kenneth, Keeseey Scott, Schlenk Matthew, Gardiner Judith, Tomko Karen, Willis Michael, Kelleher Cole, Cloutier Michael, Husby Eric, Foga Steven, Nakamura Hitomi, Platson Melisa, Wethington Michael Jr., Williamson Cathleen, Bauer Gregory, Enos Jeremy, Arnold Galen, Kramer William, Becker Peter, Doshi Abhijit, D'Souza Cristelle, Cummins Pat, Laurier Fabien, Bojesen Mikkel.* 2018. “ArcticDEM”, <https://doi.org/>, Harvard Dataverse, V1, [Date Accessed]. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>

*Ramage J.L., Irrgang A.M., Morgenstern A., Lantuit H.* Increasing coastal slump activity impacts the release of sediment and organic carbon into the Arctic Ocean // Biogeosciences. 2018. V. 15. P. 1483–1495. <https://doi.org/10.5194/bg-15-1483-2018>

*Victorov A.S.* Probabilistic model of landslide processes based on markov chains 15<sup>th</sup> international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2015, [www.sgem.org](http://www.sgem.org), SGEM 2015 Conference Proceedings, ISBN 978-619-7105-32-2/ISSN 1314-2704, 2015. V. 1. 2. P. 579–586. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

<https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>.

## Dynamic Parameters of Landslide Focus Changes in Cryolithozone (Banks Island Case Study)

T. V. Orlov<sup>1</sup>, M. V. Arkhipova<sup>1</sup>, and V. V. Bondar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS (IEG RAS), Moscow, Russia*

Landsliding is among the most massive and active exogenous processes. Now they increasingly manifest in permafrost zones due to climate change and require close attention and careful study. Analysis of the territory most prone to these processes, one of the largest islands in Northern Canada, Banks, confirmed earlier stud-

ies of landslide processes in this zone, which indicate a relationship between increased activation of landslides and abnormally warm summers. The study and assessment of the landslide focus parameters in the southern part of Banks Island showed that in 1976–1999 the development of landslides was relatively uniform. Still, after 1999 there was a sharp increase in their size. We marked two types of landslide activation: broad activations in 1999, 2011, 2012, and 2013 with a simultaneous annual descent of 20–30 landslides and occasional (local) activations, which were 1–2 landslides annually in the intervals between the broad ones. At that, the landslide foci have random spatial distribution though these processes take place in particular geological conditions and topography. The largest landslides achieve 100 m along the slope and 50 m across the slope. With the help of cluster analysis by the parameters of the sum of the length and width of landslides, 6 classes are distinguished, which differ primarily in the intensity and scale of movements. The spatial distribution of landslides by classes of behavior in time is even more random than activation by years. There were not found new activations after 2015 within the research area. Undoubtedly, the study of the landslide frequency should be continued in the future.

*Keywords:* landslides, high latitudes, climate warming

## REFERENCES

- Baolin W., Bhuwani P., Haoqiang L.* Landslide of the Mackenzie valley and adjacent mountainous and coastal regions // *Landslides*. 2009. 6:121–127. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0150-y>
- Belliveau D. K.* Coastal geomorphology of southwest Banks Island, NWT: historical and recent shoreline changes and implications for the future // Masters thesis, Faculty of Science Memorial University of Newfoundland. 2007. P. 8–18.
- Costard S.F., Fedorov A., Gargani J., Skorve J., Massé M., Mége D.* Evolution of the banks of thermokarst lakes in Central Yakutia (Central Siberia) due to retrogressive thaw slump activity controlled by insolation // *Geomorphology*. 2015. T. 241. C. 31–40.
- Fujun Niu, Jing Luo, Zhanju Lin, Jianhong Fang, Minghao Liu.* Thaw-induced slope failures and stability analyses in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau, China // *Landslides*. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0545-2>
- Geertsema M., Clague J.J., Schwab J.W., Evans S.G.* An overview of recent large catastrophic landslides in northern British Columbia, Canada // *Engineering Geology* 83. 2006. 120–143. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.06.028>
- Gibbs A.E., Nolan M., Richmond B.M., Snyder A.G., Erikson L.H.* Assessing patterns of annual change to permafrost bluffs along the North Slope coast of Alaska using high-resolution imagery and elevation models // *Geomorphology*. 2019. V. 336. P. 152–164.
- Jing Luo, Fujun Niu, Zhanju Lin, Minghao Liu, Guoan Yin.* Recent acceleration of thaw slumping in permafrost terrain of Qinghai-Tibet Plateau: An example from the Beiluhe Region // *Geomorphology*. 2019. V. 341. P. 79–85.
- Kokelj S. V., Lantz T. C., Tunnicliffe J., Segal R., Lacelle D.* Climate-driven thaw of permafrost preserved glacial landscapes, northwestern Canada // *GEOLOGY*. 2017. V. 45. 4. P. 371–374. <https://doi.org/10.1130/G38626.1>
- Leybman M.O., Kizyakov A.I., Archegova I.B., Gorlanova L.A.* Etapy razvitiya kriogenного opolzaniya na Yugorskom poluostrove i Yamale [Stages of development of cryogenic landslide on the Yugorsky Peninsula and Yamal] // *Kriosfera Zemli*. 2000. T. IV. P. 67–75 (in Russian)
- Leybman M.O., Khomutov A.V.* Statsionar “Vas’kiny dachi” na Tsentral’nom Yamale: 30 let issledovaniy [Station “Vaskiny Dachi” in the Central Yamal: 30 years of research] // *Kriosfera Zemli*. 2019. T. XXIII. 1. P. 91–95 (in Russian)
- Leibman M., Khomutov A., Kizyakov A.* Cryogenic Landslides in the West-Siberian Plain of Russia: Classification, Mechanisms, and Landforms. In book: *Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change*, Environmental Science and Engineering. P. 143–162. Publisher: Springer International Publishing, Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-00867-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00867-7_11)
- Lewkowicz A.G., Way R.G.* Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a High Arctic environment // *Nature Communication*. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09314-7>
- Mu Cuicui, Shang, Jianguo Zhang, Tingjun Fan, Chengyan Shufa, Wang Peng, Xiaoqing Zhong, Wen Feng, Zhang Mei, Mu Jia, Lin.* Acceleration of thaw slump during 1997–2017 in the Qilian Mountains of the northern Qinghai-Tibetan plateau. *Landslides*. 2020. 17. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01344-3>
- Patton A.I., Rathburn S.L., Capps D.M.* Landslide response to climate change in permafrost regions // *Geomorphology*. 2019. V. 340. P. 116–128.
- Porter Claire, Morin Paul, Howat Ian, Noh Myoung-Jon, Bates Brian, Peterman Kenneth, Keeseey Scott, Schlenk Matthew, Gardiner Judith, Tomko Karen, Willis Michael, Kelleher Cole, Cloutier Michael, Husby Eric, Foga Steven, Nakamura Hitomi, Platson Melissa, Wethington Michael Jr., Williamson Cathleen, Bauer Gregory, Enos Jeremy, Arnold Galen, Kramer William, Becker Peter, Doshi Abhijit, D’Souza Cristelle, Cummins Pat, Laurier Fabien, Bojesen Mikkel.* 2018. “ArcticDEM”. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>, Harvard Dataverse, V1, [Date Accessed].
- Ramage J.L., Irrgang A.M., Morgenstern A., Lantuit H.* Increasing coastal slump activity impacts the release of sediment and organic carbon into the Arctic Ocean // *Biogeosciences*. 2018. V. 15. P. 1483–1495. <https://doi.org/10.5194/bg-15-1483-2018>
- Rychagov G.I.* Obschaya geomorfologiya: uchebnik [General geomorphology: textbook] – 3-ye izd., pererab. i dop. / G.I. Rychagov. M.: Izd-vo Mosk. un-ta: Nauka, 2006. 416 p. (in Russian)
- Smirnov N.V.* Otsenka raskhozheniya mezhdru empiricheskimi krivymi raspredeleniya v dvukh nezavisimyykh vyborkakh [Evaluation of the discrepancy between empirical distribution curves in two independent samples] // *Byulleten’ MGU, seriya A.* 1939. V. 2. № 2. P. 3–14. (in Russian)
- Victorov A.S.* Probabilistic model of landslide processes based on markov chains 15<sup>th</sup> international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2015, [www.sgem.org](http://www.sgem.org), SGEM 2015 Conference Proceedings, ISBN 978-619-7105-32-2/ISSN 1314-2704, 2015. V. 1. 2. P. 579–586. <https://earthexplorer.usgs.gov/>. <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>

---

---

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

---

---

### О ДОЛГОВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ НОРИЛЬСКОЙ ТЭЦ-3 ПО ДАННЫМ РСА SENTINEL-1

© 2022 г. А. И. Захаров<sup>а</sup>, \*, Л. Н. Захарова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Россия

\*E-mail: aizakhar@ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 29.10.2021 г.

Приведены результаты интерферометрической обработки и анализа снимков европейских спутниковых радаров с синтезированной апертурой Sentinel-1 по территории Норильской ТЭЦ-3, полученных в период с июля 2017 по август 2020 г. Сформированные 12-дневные дифференциальные интерферограммы позволили оценить стабильность положения всех четырех топливных резервуаров ТЭЦ относительно заведомо стабильных объектов. Отмечено сильное искажающее влияние атмосферных осадков, а также процессов таяния-замерзания снежных покровов на территории ТЭЦ на качество интерферометрических измерений фаз отраженных топливными резервуарами сигналов. Обнаружено, что на всех 12-дневных интервалах наблюдения в теплое время года в период с июля 2019 по август 2020 г. взаимное положение всех четырех резервуаров и прилегающей к ним территории стабильно с точностью до 1.3 мм. Наблюдения долговременной стабильности резервуаров в период с июля 2017 по август 2020 г. по летним интерферограммам с годичным интервалом между съемками дают оценку стабильности их положения величиной в 4 мм. Можно заключить, что повреждение резервуара не было вызвано площадными смещениями отражающей поверхности исследуемой территории, как это происходит, например, вследствие таяния вечной мерзлоты в районе резервуаров.

*Ключевые слова:* Норильск, топливный резервуар, радиолокационная интерферометрия, Sentinel-1, угольный отражатель, динамика поверхности

DOI: 10.31857/S0205961422040078

#### ВВЕДЕНИЕ

Разлив нефтепродуктов 29 мая 2020 г. на топливохранилище ТЭЦ-3 города Норильска по степени воздействия на окружающую среду стал экологической катастрофой федерального масштаба. В результате разгерметизации одного из резервуаров топливохранилища произошла утечка 21 тыс. т дизельного топлива. Одной из главных версий причины аварии, озвученных руководством горно-металлургической компании “Норникель”, явилось таяние мерзлого грунта из-за аномально теплой погоды, что могло вызвать повреждение опор, на которых стояла платформа с резервуаром.

Для наблюдения за районами чрезвычайных ситуаций, а также ретроспективного мониторинга с использованием архивных данных эффективным является применение космических методов (Бондур, 2010) в совокупности с методами обработки аэрокосмических изображений (Бондур, Старченков, 2001). Задачи дистанционного измерения смещений поверхности разной природы могут успешно решаться с помощью метода дифференциальной интерферометрии (Bamler, Hartl,

1998), (Захарова, Захаров, 2019). Радиолокационная интерферометрия в схеме съемки земных покровов с повторяющихся орбит носителя как средство выявления мелкомасштабных смещений поверхности за время между съемками применяется во многих приложениях методов дистанционного зондирования Земли. В качестве примеров, близких по тематике и методам обработки к данному исследованию, можно назвать работы по наблюдению циклических смещений торфяных почв в дельте реки Селенги вследствие морозного пучения зимой и просадок из-за высыхания летом (Дагуров и др., 2016), наблюдение сантиметровых подвижек поверхности оползневого склона на берегу реки Бурей (Захарова, Захаров, 2019), температурные деформации пролетов железнодорожных мостов (Захарова, Захаров, 2018), наблюдение оползневых процессов с привлечением искусственных уголковых отражателей в условиях сильной временной декорреляции (Захаров и др., 2018).

Существует технология мониторинга динамики подстилающих покровов, специально разработанная для использования в условиях высокой временной декорреляции естественных покро-

вов. Она основана на использовании набора радарных снимков, обработанных с применением метода постоянных отражателей, обозначаемого аббревиатурой PS – Permanent Scatterers, – (Ferretti et al., 1999, 2000), (Colesanti et al., 2003a, 2003b) и вариантов развития этого метода: SQUEESAR (Ferretti et al., 2011), STAMPS (Hooper et al., 2004), метода малых базовых линий SBAS (Berardino et al., 2002) и др. Для их корректной работы необходимо наличие “постоянных отражателей” – объектов, дающих стабильный эхо-сигнал на всей серии съемок. Недостаточное их количество или недостаточная стабильность на протяжении длинной серии съемок являются ограничениями этой группы методов. Предварительная обработка и анализ данных показали, что заметная временная декорреляция даже на хорошо отражающих объектах инфраструктуры ТЭЦ и металлургического завода не позволит получить надежные результаты при использовании методов PS, поэтому данное исследование базируется на вычислении и анализе временного ряда стандартных дифференциальных интерферограмм (DInSAR).

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Технология радиолокационной интерферометрии предполагает проведение съемок с близких орбит носителя радиолокационной аппаратуры. Спутниковые радары с синтезированной апертурой (РСА) Sentinel-1 Европейского космического агентства, выполняющие регулярную съемку с повторяющихся орбит с интервалом 12 дней в С-диапазоне (длина волны  $\lambda = 5.6$  см), являются одним из наиболее подходящих источников данных для целей данной работы. Анализ архива Copernicus (см. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) выявил подходящие для интерферометрической обработки снимки территории ТЭЦ-3 спутником Sentinel-1В с октября 2016 г. по настоящее время. Съемки проводились на нисходящей части витка справа по ходу движения спутника с углом обзора  $41^\circ$  к местной вертикали. Девятого июня 2020 г., через несколько дней после катастрофы, дополнительно была выполнена съемка со спутника Sentinel-1А в той же геометрии наблюдений, что дало возможность сформировать две дополнительные интерферометрические пары с интервалом между съемками вдвое меньшей длины: 6 дней. Таким образом, в работе использованы интерферометрические пары с различными интервалами между съемками: от 6 дней до 1 г.

Использованные данные Sentinel-1 уровня обработки Single Look Complex были получены в широкозахватном интерферометрическом режиме съемки IW с использованием метода прогрессивного сканирования снимаемого участка по-

верхности лучом антенны в азимутальном направлении (terrain observation with progressive scans, TOPS (Torres et al., 2012)). Широкая полоса захвата обеспечивалась последовательной съемкой элементарных кадров при переключении угла визирования в угломестной плоскости, а периодическое повторение циклограммы сканирования с перемещающегося носителя обеспечило наращивание полосы съемки. Каждый пиксел изображения представлен комплексными отсчетами сигнала (синфазная и квадратурная компоненты). Расстояние между пикселями по наклонной дальности 2.3 м, расстояние между пикселями соседних строк в азимутальном направлении 14.1 м.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЯ В ЗОНЕ СЪЕМКИ

Климат региона характеризуется отрицательной среднегодовой температурой воздуха, продолжительной зимой с сильными морозами и метелями, весьма коротким дождливым и холодным летом, наличием частых и резких смен погоды. Полярный день длится с 20 мая по 24 июля, минимальное среди трех летних месяцев среднее количество осадков приходится на июль (32 мм), максимальное – на август (52 мм). Устойчивый снежный покров образуется в первой половине октября, исчезая со второй декады мая. Доминирующие ветры южной четверти зимой являются причиной переноса больших масс снега, формирования глубоких сугробов, образования застрогов на снеговой поверхности. Для данного региона характерна сплошная многолетняя мерзлота. Наиболее типичны тундровые глеевые почвы, встречаются также болотные и аллювиальные почвы (Васильевская, 1980).

ТЭЦ-3 примыкает к металлургическому заводу им. Б.И. Колесникова с юго-запада, составляя с ним единую промышленную зону на краю плато Надежда. Территория окрестностей ТЭЦ-3 на снимке Google Earth показана на рис. 1. На врезке справа сверху дан увеличенный фрагмент изображения с линейкой топливных резервуаров, ориентированной по диагонали. Резервуары пронумерованы снизу вверх, от резервуара № 2 до резервуара № 5 (можно также различить круглый след от демонтированного ранее резервуара № 1). Длинной стрелкой у правого края рис. 1 показано направление полета спутника Sentinel-1, широкими стрелками показано направление радарной съемки (вправо по ходу движения носителя). Так как съемка выполняется примерно с восточного направления, западные стенки резервуаров и небольшая прилегающая к ним часть промплощадки оказываются в радиотени. Соответственно, та сторона аварийного резервуара № 5, где произошел разрыв стенки и утечка топлива (короткая



Рис. 1. Снимок территории ТЭС-3 и геометрия съемки PCA Sentinel-1 на нисходящем витке.

белая стрелка на врезке рис. 1), не видна на изображениях Sentinel-1 непосредственно.

Топливные резервуары — сооружения цилиндрической формы диаметром 45 м, центры которых расположены на расстоянии 75–78 м друг от друга. Уклон конусообразных крыш резервуаров не превышает  $20^\circ$ . Радиолокационные изображения таких объектов с гладкими в масштабе длины волны сигнала радара поверхностями отличаются от привычных оптических изображений. Доминирующий механизм взаимодействия радиоволны с гладкой металлической поверхностью конструкции резервуара — зеркальное отражение. Вследствие этого отраженный крышей сигнал  $S_R$  в геометрии съемки Sentinel-1 не возвращается к радару (рис. 2) и поэтому не регистрируется приемной антенной.

Отраженный стенками резервуаров и прилегающей поверхностью площадки сигнал состоит из двух компонент: сигнала двукратного отражения  $D$  и однократного  $S$ . Боковая стенка резервуара образует с поверхностью промплощадки двугранный угол, благодаря чему после последовательного зеркального отражения стенкой АО и поверхностью площадки ОВ сигнал возвращается к радару (см. рис. 2, лучи  $D_1$  и  $D_2$  на схеме справа). Особенностью отражения сигнала двугранным уголком является равенство длины пути для всех лучей, падающих на грани, вследствие чего резер-

вуар высотой около 20 м выглядит на радарном изображении с разрешением 2.3 м по наклонной дальности яркой точечной целью, расположенной на дальности, соответствующей вершине уголка — точке  $O$ . Мелкомасштабные смещения граней уголка приводят к смещению положения вершины  $O$  и, соответственно, изменению расстояния до радара. В отличие от зеркально отраженного крышей и ушедшего в сторону сигнала  $S_R$ , никак не влияющего на формирование радиолокационного изображения, сигнал обратного рассеяния примыкающей шероховатой поверхностью промплощадки  $S_S$  регистрируется радаром, что дает возможность наблюдать за ее динамикой даже в отсутствие двукратного отражения боковой поверхностью резервуара.

Хотя уголковый отражатель имеет широкую диаграмму обратного рассеяния, отклонение его граней от строгой взаимной ортогональности приводит к расщеплению главного лепестка диаграммы на два узких лепестка, направление которых несколько отличается от направления на радар (Кобак, 1975). Вследствие этого возможны флуктуации уровня отраженного сигнала при изменении угла наблюдения объекта радаром. Наиболее стабильной частью конструкции двугранный уголком является неровная поверхность промплощадки (линия ОВ на рис. 2). В результате увлажнения почвы после дождя условия отраже-

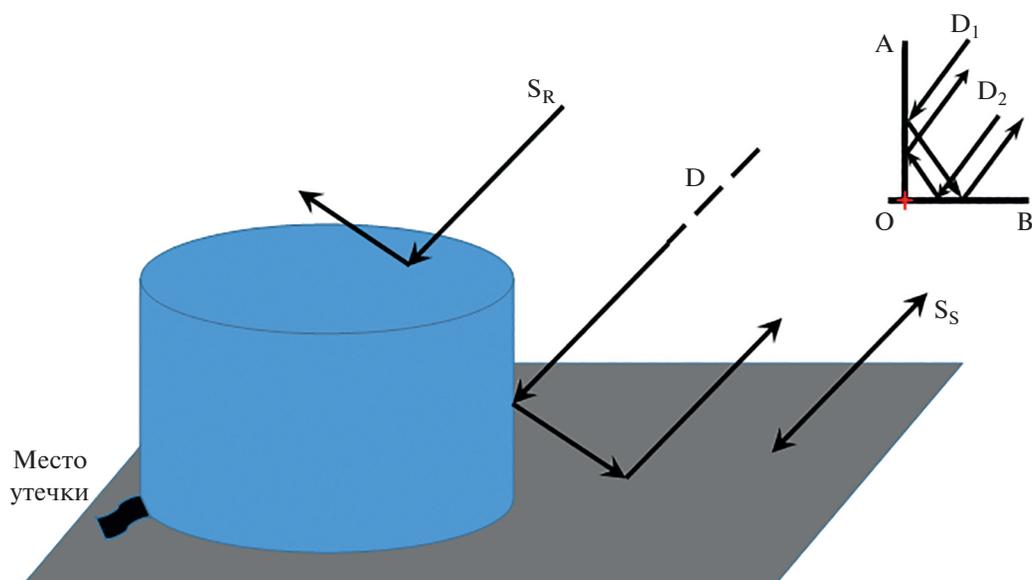


Рис. 2. Взаимодействие радиоволн с конструкцией резервуара и промплощадкой.

ния сигнала вдоль линии  $OB$  могут меняться, что может быть причиной изменения уровня и направления отраженного сигнала, а также смещения положения вершины  $O$  двугранного уголка. Наиболее часто на изученных радарных изображениях ТЭЦ-3 отмечалось снижение уровня отражения вплоть до его полного пропадания у резервуара № 3 после дождей, шедших в период до 3–5 дней перед съемкой (съемки в теплое время года с датами 8.07.2018, 20.07.2018, 13.09.2019). Другой причиной изменения условий отражения для сигналов  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $S_S$  является образование снежного покрова на прилегающей к резервуару поверхности  $OB$  в холодное время года. В работе (Захаров, Захарова, 2017) на примере анализа сигналов, отраженных опорами линии электропередач на снежной равнине, показано, что, например, равномерный свежий снежный покров толщиной 4 см с плотностью снега 0.25 приводит к увеличению электрической длины пути сигнала от радара до эффективного фазового центра отражения на величину порядка 1 см. Такого рода добавки могут быть неверно интерпретированы как смещения/просадки отражающей поверхности. Кроме того, неравномерный снежный или снежно-ледовый покров площадки вдоль линии  $OB$  может быть причиной видимой неортогональности граней и соответствующего снижения уровня отражения. Вероятно, по этой причине заметное снижение уровня отражения резервуаром № 3 наблюдалось, например, в условиях заснеженной поверхности почвы в дни съемок 24.10.2018, 6.12.2019, 28.02.2020, 11.03.2020. Падение уровня сигнала, отраженного резервуаром №5, отмечено

в дни съемки 10.11.2017, 5.11.2018, 17.11.2018, 29.11.2018, 28.05.2019, 19.10.2019.

#### МЕТОДЫ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В основе метода радарной интерферометрии лежит использование информации о разности фаз радиолокационных эхо-сигналов, зарегистрированных радиолокационной системой в двух близких точках пространства, для которых выполняется условие взаимной когерентности сигналов. При этом разность фаз сигналов зависит от разности расстояний до цели и несет информацию о рельефе поверхности, а в двухпроходном варианте еще и об изменении условий прохождения сигнала до цели за время между съемками (Rosen et al., 2000), (Захаров и др., 2015).

Интерферограмма – это изображение, состоящее из разности фаз сигналов  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ , получаемое в результате поэлементного комплексного перемножения отсчетов сигналов  $U_1$  и  $U_2$ , отраженных одним и тем же элементом поверхности, но принятых в двух точках, отличающихся по расположению в пространстве. Выражение для комплексной интерферограммы в двухпроходной схеме съемки таково:

$$U_1 U_2^* = u_1 u_2 \exp(j(\varphi_1 - \varphi_2)) = u_1 u_2 \exp\left(\frac{-j4\pi\Delta r}{\lambda}\right), \quad (1)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  – амплитуды сигналов,  $\Delta r$  – разность расстояний от точек съемки до выбранного элемента поверхности,  $\lambda$  – длина волны.

Точность измерений разности фаз на интерферограмме определяется когерентностью отражен-

ных протяженной поверхностью радиолокационных сигналов. Интерферометрическая когерентность характеризует ошибки измерений разности фаз и, соответственно, относительную, межпиксельную точность измерения высот рельефа и подвиежек подстилающей поверхности (Bamler, Hartl, 1984). Степень когерентности сигналов может быть оценена непосредственно по радарным данным, она определяется следующим выражением:

$$\gamma = \frac{E\{U_1 U_2^*\}}{\sqrt{E\{|U_1|^2\} E\{|U_2|^2\}}}, \quad (2)$$

где  $E\{\}$  – операция взятия математического ожидания по некоторому пространственному ансамблю отсчетов с центром в текущем элементе/пикселе изображения. Аналитическое выражение зависимости дисперсии разности фаз от когерентности в соответствии с граничными условиями Крамера-Рао из (Rodríguez, Martín, 1992) таково:

$$\sigma^2(\Delta\varphi) = \frac{1}{2N_L} \frac{1-\gamma^2}{\gamma^2}, \quad (3)$$

где  $N_L$  – количество отсчетов в пространственном ансамбле. В соответствии с этим, следствием снижения когерентности является возрастание дисперсии интерферометрической разности фаз.

В идеальных условиях стабильной поверхности и ничтожно малых шумов аппаратуры основной вклад в разность фаз на интерферограмме  $\varphi$ , зависящей от разности наклонных дальностей, вносит “топографическая” фаза  $\varphi_{topo}$ , передающая вариации рельефа поверхности. В общем случае на величину разности фаз  $\varphi$ , кроме рельефа, влияют также мелкомасштабные площадные смещения поверхности (динамика поверхности) за время между съемками  $\varphi_d$ , атмосферные флуктуации электрической длины пути сигнала радара  $\varphi_a$ , флуктуации электрической длины пути сигнала радара  $\varphi_s$  в снежно-ледовом слое, накапливаемом на земле в холодное время года, случайные смещения положения фазового центра отражения сигнала из-за пространственной и временной декорреляции –  $\varphi_{spat}$  и  $\varphi_{temp}$ , шумы приемной системы (включая шумы квантования АЦП)  $\varphi_n$ , шумы, вносимые системой обработки  $\varphi_p$ , а также неизвестная начальная разность фаз  $\varphi_0$ , единая для всей интерферограммы (Захаров и др., 2015):

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_d + \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_s + \Delta\varphi_{spat} + \Delta\varphi_{temp} + \Delta\varphi_n + \Delta\varphi_p + \Delta\varphi_0. \quad (4)$$

Шумы пространственной и временной декорреляции, а также тепловые шумы определяют меж-

пиксельную точность измерений, они могут быть снижены пространственной фильтрацией интерферограммы при неизбежном снижении пространственного разрешения.

Для обработки интерферометрических пар снимков применен метод классической дифференциальной интерферометрии, когда топографическая фаза  $\varphi_{topo}$  на интерферограмме оценивается по данным внешней цифровой модели рельефа и вычитается. С этой целью была использована общедоступная цифровая модель рельефа GMTED (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data), доступная по адресу <https://www.usgs.gov/core-science-systems/eros/coastal-changes-and-impacts/gmted2010>. Для снижения уровня шумов и приведения к одинаковому линейному разрешению по азимуту и дальности выполнялось некогерентное суммирование четырех соседних по дальности пикселей интерферограммы. Дополнительно выполнялась нелинейная фильтрация интерферограммы фильтром Голдстина (Goldstein, Werner, 1998) с эффективным размером окна  $5 \times 5$ . Сравнительно крупномасштабные флуктуации фазы на атмосферных неоднородностях, равно как и добавка в виде неизвестной начальной фазы  $\varphi_0$  могут быть оценены по сигналу заведомо стабильного близлежащего объекта поверхности и исключены из (4).

Уровень фазовых шумов  $\varphi_p$ , обусловленных временной декорреляцией, зависит от интервала между съемками сеансов интерферометрической пары. Временная декорреляция возрастает при увеличении интервала между съемками, при изменении шероховатости и диэлектрических свойств слоя отражающей поверхности, а потому при составлении интерферометрических пар предпочтительно использовать снимки с небольшим интервалом между съемками, выполненные в сходных сезонных и метеорологических условиях, а также степени увлажненности покровов.

Под шумами обработки  $\varphi_p$  обычно понимают шумы вычислений, обусловленные конечным количеством разрядов при цифровом представлении сигнала, однако использование данных Sentinel-1 вносит свои особенности. Из-за большой крутизны краев доплеровского центроида в элементарном кадре для режима съемки TOPS ошибки совмещения снимков Sentinel-1 из разных сеансов съемки приводят к заметному набегу фазы по полю кадра как в азимутальном, так и поперечном направлении. Так, по оценкам (Lanari et al, 2015), ошибки совмещения порядка нескольких тысячных пикселя дают заметный, в несколько градусов, фазовый набег на краях кадра. Следовательно, ошибки совмещения снимков могут быть источником неконтролируемых фазовых ошибок на интерферограммах.

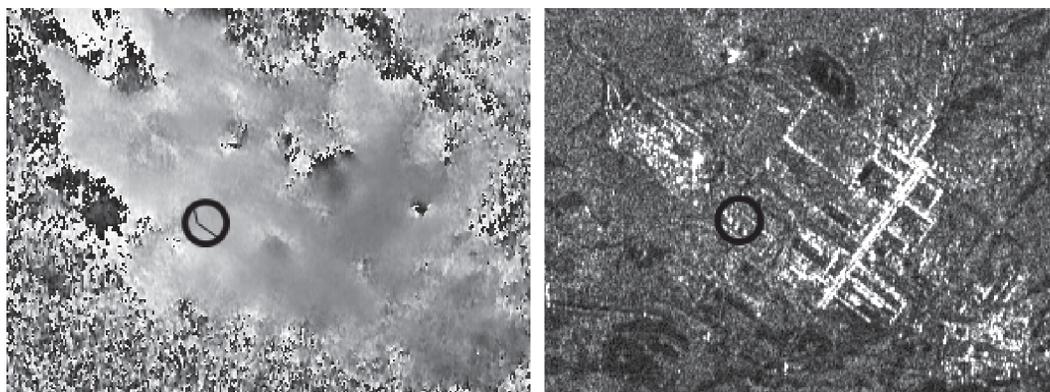


Рис. 3. Фрагменты интерферограммы (слева) и амплитудного изображения Sentinel-1 (справа) для интерферометрической пары 10 мая–3 июня 2020 г.

Точность фазовых измерений при съемке в средних и высоких широтах снижается из-за резкого изменения диэлектрических свойств подстилающих покровов и выпадения/таяния снега в холодное время года. В работе (Guneriussen et al., 2001) установлена несложная связь между приращением односторонней длины пути (и фазы) сигнала и приращением толщины снежного покрова за время между съемками. Однако получить достаточно точные фазовые поправки, опираясь на сведения о толщине слоя выпавшего снега по данным близлежащих наземных метеостанций, невозможно по причине локальных особенностей снегопада, переноса снега ветрами на открытых территориях, а также работ по расчистке/уборке снега в зоне съемки.

Выделенная с некоторой степенью точности разность фаз  $\Delta\varphi_d$  связана с изменением разности наклонных дальностей вследствие смещения поверхности  $\Delta r_d$  за время между съемками следующим соотношением:

$$\Delta\varphi_d = -4\pi\lambda^{-1}\Delta r_d. \quad (5)$$

Необходимо подчеркнуть, что изменение односторонней длины пути сигнала за время между съемками интерферометрической пары снимков на половину длины волны (2.8 см для PCA Sentinel-1) приводит к дополнительному фазовому набегу  $2\pi$ , что не позволяет выявить это изменение. Добавим, что появление слоя свежего снега толщиной около 10.5 см с ранее приведенными физическими параметрами за время между съемками также дает фазовую добавку  $2\pi$ , и также не может быть обнаружено.

Первые представления о наличии или отсутствии динамики подстилающей поверхности на территории ТЭЦ-3 по данным интерферометрической обработки данных Sentinel-1В в период 10 мая–03 июня 2020 г. (между этими датами произошла авария) были описаны в работе (Захаров и др., 2020).

На интерферограмме (рис. 3, слева) полутонами переданы вариации интерферометрической разности фаз от 0 до  $2\pi$ , которым соответствуют возможные радиальные смещения поверхности в диапазоне от 0 до 2.8 см. Справа приведено соответствующее интерферограмме амплитудное изображение, на котором кружком обведены эхо-сигналы резервуаров № 2–№ 5. Внутри кружка на интерферограмме показано положение профиля разности фаз, проходящего через все четыре резервуара с северо-запада на юго-восток. Значения фазы вдоль этого профиля отклонились бы от постоянного значения при смещении резервуаров, которое могло быть вызвано таянием мерзлотного грунта. Для исследования влияния иных эффектов на положение резервуаров, например, морозного пучения зимой, в дополнение к таянию вечной мерзлоты в теплое время года, были также проанализированы интерферограммы, приходящиеся на осенне-зимний период 2019–2020 гг. Оказалось, что относительно начала профиля, где в качестве опорной точки взято положение одного, предположительно стабильного, резервуара, все флуктуации положения остальных резервуаров, включая поврежденный, находятся в пределах 2–3 мм на всех интервалах наблюдения. Сделано заключение, что морозное пучение зимой 2019–2020 гг. и таяние почв в районе ТЭЦ-3 в апреле–мае 2020 г. не привели к сколь-нибудь заметным смещениям восточных стенок резервуаров и прилегающей к ним поверхности промплощадки (Захаров и др., 2020).

#### АНАЛИЗ КРАТКОВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ РЕЗЕРВУАРОВ С ИЮЛЯ 2019 ГОДА ПО АВГУСТ 2020 ГОДА

Возможными причинами повреждения резервуара №5 могли быть более ранние подвижки подстилающей поверхности, для чего временной

интервал интерферометрических наблюдений необходимо расширить, вместе с тем учитывая, что существенным ограничивающим фактором при обработке пар снимков с большим интервалом между съемками является рост временной декорреляции отражений. Общепринятым решением задачи мониторинга медленных подвижек поверхности в условиях высокой временной декорреляции является применение метода постоянных отражателей PS (Ferretti et al., 1999) и аналогичных ему методов. Особенностью метода PS является необходимость использования длинных рядов наблюдений и применение методов статистического анализа для выявления надежных отражателей. Критерием выбора точек-кандидатов в постоянные отражатели является стабильность отражения сигнала. Анализ стабильности отражения резервуарами на интервале с октября 2017 г. по июль 2020 показал, что они не удовлетворяют критерию стабильности из (Ferretti et al., 1999, 2000), (Colesanti et al., 2003a, 2003b). Отношение стандартного отклонения амплитуды сигнала к среднему значению в серии из 40 снимков равно 0.6 для резервуара № 2, 0.93 для № 3, 0.81 для № 4 и 0.98 для № 5. Причиной столь высокой нестабильности может быть влияние атмосферных осадков, а также процессов таяния/замерзания снега на характеристики двойного переотражения сигнала крупными конструкциями, составленными стенкой резервуара и прилегающей к нему поверхностью промплощадки. Неизбежные резкие изменения фазы отраженных сигналов из-за изменения радиофизических свойств подстилающих покровов отличаются от предполагаемых в методе PS медленных монотонных изменений, а потому методы семейства PS не в состоянии в данном случае надежно идентифицировать резервуары как постоянные отражатели, и, таким образом, они не могут считаться надежным инструментом для измерения возможных смещений резервуаров. По этой причине в дальнейшем в первую очередь будут обсуждаться измерения, проведенные с использованием серии классических дифференциальных интерферограмм, причем измерения фазы и дальнейшие оценки динамики резервуаров будут выполняться в точках расположения резервуаров, для которых зафиксирован максимальный уровень отражения.

Для анализа стабильности территории ТЭЦ-3 в период с июля 2019 по август 2020 г., предположительно охватывающий основные процессы смещения отражающих объектов, были построены дифференциальные интерферограммы с 12-дневными интервалами между съемками. В качестве опорных, предположительно стабильных деталей на отражающей поверхности были выбраны три объекта: трубопровод над дорогой (500 м к северо-востоку от резервуаров), трехгранный уголок, образованный прямым углом здания и поверхно-

стью промплощадки (1050 м в направлении восток-юго-восток), и элемент у внутренней стороны ограды территории резервуаров (70 м к юго-западу от отражающей стенки резервуара № 3). Фрагменты снимков Google Earth этих объектов приведены на рис. 4, где стрелками показано их расположение. В пределах элементарного кадра Sentinel-1 первые два — это наиболее стабильные точечные объекты с высоким уровнем интерферометрической когерентности, вероятно, из-за небольших (по сравнению с резервуарами) геометрических размеров этих объектов. Уровень когерентности сигналов этих объектов превышает 0.95 во всех парах снимков, сделанных в июле 2019—августе 2020 гг., за исключением пар, содержащих сентябрьские снимки, когда когерентность снижалась до 0.85, и апрельских с когерентностью 0.7. Как можно судить по некоторым зимним интерферограммам, особенностью первого из них, трубопровода над дорогой, является однократное рассеяние сигнала радара конструкцией трубы, обычно не укрытой снежным слоем. Для здания как уголкового отражателя характерно последовательное отражение от двух стен технического здания и прилегающей поверхности промплощадки. В этом случае возможно влияние слоя снега, лежащего на площадке. Поскольку у этого объекта когерентность отражений оказалась самой высокой на всех интерферограммах, он был выбран в качестве опорного.

На рис. 5 приведен временной ход разностей фаз для четырех резервуаров № 2—№ 5 на интервале 12 дней в период с июля 2019 по август 2020 г.

На этом рисунке видна высокая стабильность (повторяемость графиков) разности фаз топливных резервуаров для 12-дневных интервалов наблюдения динамики относительно опорного объекта и относительно друг друга летом 2019 г., в декабре—марте и мае—августе 2020 г. (небольшие отклонения от нуля на графике). Отклонения фаз для резервуаров в мае—августе составляют 0.2—0.3 рад, что соответствует их возможным взаимным смещениям в направлении на спутник 0.9—1.3 мм.

На рис. 6 приведены сведения о среднесуточной температуре и высоте снежного покрова на метеостанции Норильска по данным веб-архива [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru). Отметим влияние вариаций диэлектрических свойств отражающих покровов в результате выпадения снеговых осадков 13 сентября, в период с октября 2019 по январь 2020 г., а также таяния/замерзания снежно-ледовых покровов в апреле 2020 г. на сильный рост флуктуаций фаз сигналов резервуаров в это время. Отметим, что из-за 2 $\pi$ -неоднозначности фазовых измерений возможны ошибки, приводящие к занижению реальных флуктуаций фазы и соответствующей ей длины пути сигнала.



Рис. 4. Фрагменты снимков Google Earth, содержащие опорные объекты: трубопровод (слева), внутренний угол здания (в центре) и сооружение у ограждения резервуаров (справа).

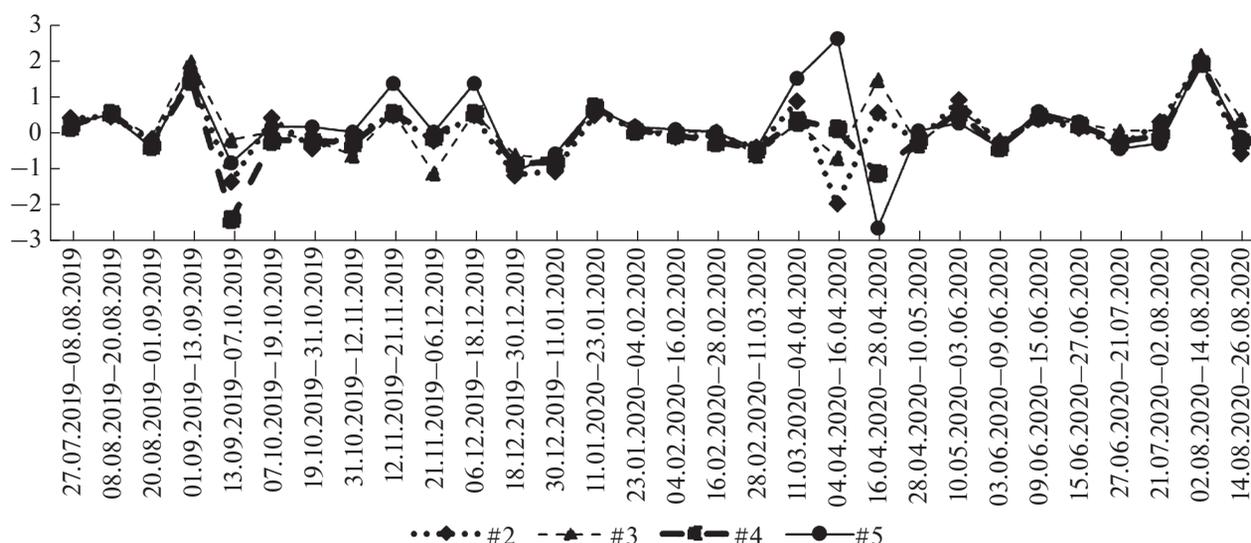


Рис. 5. Временной ход смещений фазы сигнала резервуаров относительно трубопровода (в радианах), в период с 27.07.2019 по 26.08.2020.

Переход среднесуточной температуры воздуха через ноль в апреле и вызванное этим интенсивное снеготаяние также стали причиной роста флуктуаций положения фазового центра отражения сигнала двугранными уголками резервуаров и повышения разброса фазовых измерений. Аналогичным образом, выпадение снега осенью, ветровая модификация толщины снежных покровов, снегоуборка на территории промзоны стали причиной случайных изменений толщины снежного покрова вблизи резервуаров и роста флуктуаций фазы (см. левую часть рис. 6). Падение когерентности сигналов резервуаров в среднем от 0.92 до 0.7–0.8 осенью и в начале зимы, а также до 0.6–0.7 в апреле является хорошим индикатором причины резкого роста фазовых флуктуаций. В то же время можно утверждать, что измерения фазы отраженных сигналов резервуарами свидетель-

ствуют о высокой (порядка 1.3 мм) стабильности взаимного положения резервуаров и поверхности промплощадки в мае–августе 2020 г. на коротких, 12-дневных интервалах при условии высокой интерферометрической когерентности.

Теоретическая оценка точности интерферометрических измерений в принятой методике обработки может быть получена исходя из уровня когерентности сигналов, отраженных резервуарами. Приведенная выше формула (2) дает достаточно точные оценки фазовых ошибок при условии высокого уровня когерентности. Приняв  $\gamma = 0.9$ , получим стандартное отклонение фазы равным 0.34 радиан. Соответствующая ошибка измерения радиальных смещений не превышает 1.5 мм, что соответствует экспериментальным оценкам, сделанным выше.

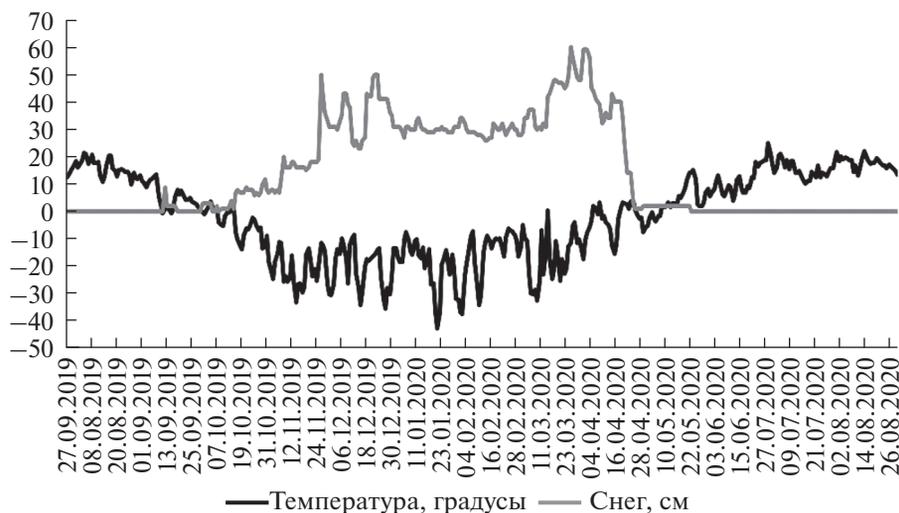


Рис. 6. Среднесуточная температура воздуха и толщина снежного покрова.

Отдельно необходимо прокомментировать фазовые измерения по резервуару № 5, к разборке которого приступили в конце июля 2020 г.: несмотря на отсутствие сигнала двойного переотражения, по фазе сигнала  $S_S$ , отраженного поверхностью промплощадки в месте расположения резервуара, можно судить о сохраняющейся стабильности положения подстилающей поверхности в процессе разборки резервуара и далее, в августе 2020 г.

#### АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ НА ГОДИЧНЫХ ИНТЕРВАЛАХ

Для выявления монотонных медленных смещений подстилающих покровов на больших интервалах времени наиболее удобно проводить измерения на серии дифференциальных интерферограмм с нарастающим временным интервалом между съемками и единым базовым сеансом съемки. В качестве базового нами был выбран сеанс от 1 сентября, последний из проведенных в теплую сухую погоду в начале осени. Фазовые измерения для резервуара № 5 по 23 интерферограммам в период с 1 сентября 2019 г. по 21 июля 2020 г. даны на рис. 7 сплошной линией. По оси абсцисс отложены даты второй съемки в интерферометрической паре. Особенностью таких интерферограмм с длинными интервалами является снижение когерентности до 0.6–0.7 у резервуаров в зимнее время из-за роста временной декорреляции отражений и неизбежное снижение точности измерений.

Для сравнения сформируем подобный график, выполнив суммирование с накоплением разностей фаз на коротких интервалах с рис. 5 для резервуара № 5. Особенностью такого варианта из-

мерений фазы является накопление ошибок измерений на коротких интервалах, хотя и при более высокой точности отдельных измерений (более высокой интерферометрической когерентности из-за более коротких временных интервалов).

На рис. 7 пунктирной линией показан результат такого накопления на годичном интервале времени, начиная с 1 сентября 2019 г. По оси абсцисс отложена конечная точка интервала накопления.

Почти совпадающие в начале интервала графики фазы разбегаются в холодное время года на величину порядка 2 радиан из-за роста ошибок измерений в условиях пониженной когерентности сигналов интерферометрических пар. Отметим неуклонный рост разности фаз с октября по март, который, скорее всего, обусловлен накоплением снега в результате снегопадов и ветрового переноса снега. Различие в измерениях снижается после схода снежного покрова в апреле. Начиная с мая значения фазы близки к  $-0.5$  рад, что близко к ошибкам измерений, хотя и может быть интерпретировано как смещение фазового центра отражения резервуара на 2 мм вверх. Можно утверждать, что зимний рост разностей фаз — это результат накопления снега вблизи резервуара, а не монотонного проседания, закончившегося в апреле возвращением отражающего объекта в исходное положение.

Для проверки достоверности околонулевых значений фаз после таяния снежного покрова были обработаны 18 пар снимков с длительными, более полугода, интервалами между съемками, полученные исключительно в теплое время года и содержащие зимний период внутри интервала. При выборе достоверных фазовых измерений бы-

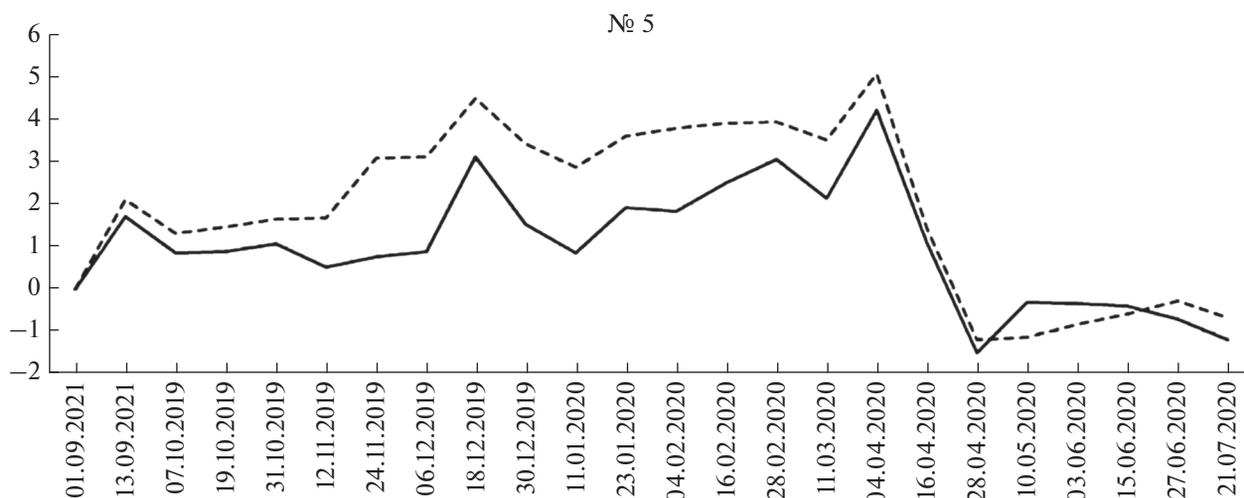


Рис. 7. Рост разностей фаз сигналов резервуара № 5 (в радианах) на годичном интервале времени при увеличении интервала времени между съемками (сплошная линия) и накоплении измерений коротких интервалов (пунктирная линия).

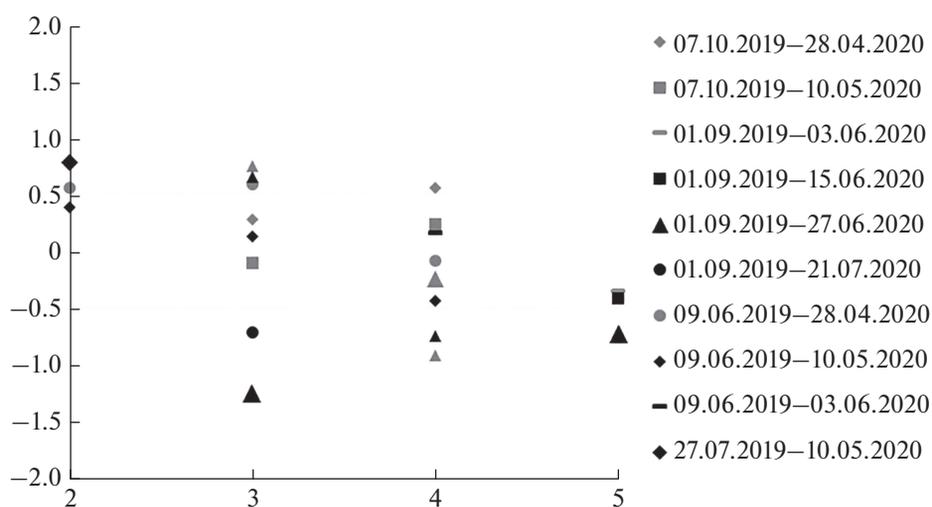


Рис. 8. Фазовые измерения для резервуаров при длинных интервалах времени между съемками.

ли исключены измерения, которым сопутствовала когерентность ниже 0.8. Оказались исключены летние съемки, особенностью которых было наличие осадков в день съемки или же суммарное количество осадков оказалось больше 4 мм за 5 дней перед одной из съемок. На рис. 8 приведены фазовые измерения для четырех резервуаров на 10 интерферометрических парах с длинными, от 6 до 12 месяцев интервалами между съемками в период с июля 2019 по июль 2020 г.

Исходя из заданных требований уровня когерентности, на резервуары № 2 и № 5 пришлось по 3 измерения, а на резервуары № 3 и № 4 по 8 измерений. Среднее значение фазы равно 0.6 рад для резервуара № 2, 0.06 рад для № 3,  $-0.17$  рад

для № 4 и  $-0.49$  рад для № 5. Видно, что взаимное положение резервуаров по фазе находится в пределах 1 рад, что эквивалентно потенциальному взаимному смещению на 0.4 см по наклонной дальности.

Подобный уровень стабильности взаимного положения резервуаров на годичных интервалах наблюдается и несколькими годами ранее, в материалах обработки данных PCA Sentinel-1, полученных в период 2017–2019 гг. Три набора измерений фазы для топливных резервуаров на летних интерферограммах с годичным интервалом приведены в табл. 1. Условием отбора этих пар снимков было отсутствие значимых осадков в день съемки, а также за несколько дней до съемки.

**Таблица 1.** Фазовые измерения по резервуарам на годовых интерферограммах, рад

Даты съемки	Резервуар №2	Резервуар №3	Резервуар №4	Резервуар №5
25.07.2017–20.07.2018	0.1	0.1	0.6	0.5
20.07.2018–27.07.2019	–0.9	–0.7	–1.2	–0.9
27.07.2019–10.05.2020	0.8	–1.6	–1.1	0.4

Несмотря на выявленную повышенную нестабильность отражений на коротких интервалах съемки в осенний и весенний периоды внутри периода холодного времени 2019–2020 гг., измерения из табл. 1 говорят о довольно высокой стабильности положения отражающих центров резервуаров на годовых интервалах в 2017–2019 гг. Среднеквадратичное отклонение флуктуаций фазы на каждой интерферограмме находится в пределах 0.7–1 рад, что соответствует флуктуациям положения объектов в пределах 4.5 мм. Эти результаты позволяют сделать предположение о стабильности положения топливных резервуаров ТЭЦ-3 и прилегающих к ним участков промплощадки. При этом необходимо помнить, что сравнительно низкое, хуже 10 м, пространственное разрешение использованных радарных данных не дает возможности выявлять возможные площадные смещения участков поверхности меньшего линейного размера, которые могли бы быть причиной повреждения резервуара № 5.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методов радарной интерферометрии для наблюдения стабильности топливных резервуаров ТЭЦ-3 с целью прояснения причины аварии на пятом резервуаре, повлекшей утечку большого объема дизельного топлива в окружающую среду, сильно осложняется искажающим влиянием атмосферных осадков, нарастания снежного покрова в холодное время года и его таяния весной. Особенностью отражения сигнала резервуаром является двойное отражение сигнала последовательно его боковой стенкой и прилегающим участком промплощадки ТЭЦ-3. Смачивание/высыхание поверхности прилегающей площадки, нарастание на ней снежного покрова в зимнее время и его таяние весной приводят к изменениям отражательных свойств этой грани двугранного уголка, смещениям положения фазовых центров отражения, ошибкам интерферометрических измерений разности фаз сигналов повторяющихся съемок. Результаты исследования вариаций интерферометрической разности фаз в местах расположения резервуаров позволяют сделать заключение о том, что взаимное положение всех четырех резервуаров ТЭЦ (их восточных стенок) и прилегающей к ним территории было стабильно в диапазоне 2–3 мм при измерениях на 12-дневных интервалах времени осенью

2019–летом 2020 гг., в том числе на 24-дневном интервале времени, охватывающем аварийное событие. В теплое время интервала наблюдений этого периода взаимная стабильность положения резервуаров находилась в пределах 1.3 мм. При годовых интервалах времени между съемками флуктуации положения резервуаров не превышают 4.5 мм, в том числе в 2017–2018, 2018–2019 гг. Можно предположить, что разгерметизация резервуара не была вызвана площадными смещениями отражающих поверхностей и конструкций на территории ТЭЦ-3, по крайней мере, с июля 2017 г.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания.

### 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., Старченков С.А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Извест. высш. уч. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
- Васильевская В.Д.* Почвообразование в тундрах Средней Сибири. М.: “Наука”, 1980. 236 с.
- Дагуров П.Н., Дмитриев А.В., Добрынин С.И., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н.* Радиолокационная интерферометрия сезонных деформаций почвы и фазовая модель обратного рассеяния микроволн двухслойной средой с шероховатыми границами // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 7. С. 585–591.
- Захаров А.И., Захарова Л.Н.* Наблюдения динамики снежного покрова на радарных интерферограммах L-диапазона // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 190–197.
- Захаров А.И., Захарова Л.Н., Красногорский М.Г.* Мониторинг оползневой активности методами радарной интерферометрии с помощью трехгранных уголкового отражателя // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 3. С. 80–92.
- Захаров А.И., Захарова Л.Н., Митник Л.М.* Мониторинг стабильности топливных резервуаров Норильский ТЭЦ-3 методами радарной интерферометрии // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 281–285.

- Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.: URSS, 2015. 248 с.
- Захарова Л.Н., Захаров А.И. Обнаружение динамики мостов методом радиолокационной интерферометрии // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 42–51.
- Захарова Л.Н., Захаров А.И. Наблюдение динамики зоны оползня на реке Бурея по данным интерферометрической съемки Sentinel-1 в 2017–2018 гг. // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 273–277.
- Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. М.: Сов. Радио, 1975. 348 с.
- Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry // Inverse Problems. 1998. V. 14. P. R1–R54.
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2002. V. 40. № 11. P. 2375–2383.
- Colesanti C., Ferretti A., Novali F., Prati C., Rocca F. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers technique // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003a. V. 41. P. 1685–1700.
- Colesanti C., Ferretti A., Prati C., Rocca F. Monitoring landslides and tectonic motion with the Permanent Scatterers technique // Engineering Geology. 2003b. V. 68 P. 3–14.
- Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2011. V. 49. № 9. P. 3460–3470.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS-1999). 28 June–2 July 1999. Hamburg, Germany. 1999. V. 3. P. 1528–1530.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2000. V. 38. № 5. P. 2202–2212.
- Goldstein R.M., Werner C.L. Radar interferogram filtering for geophysical applications // Geophys. Res. Letters. 1998. V. 25. № 21. P. 4035–4038.
- Guneriussen T., Høgda K.A., Johnsen H., Lauknes J. InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 2001. V. 39. № 10. P. 2101–2108.
- Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. № 23. <https://doi.org/10.1029/2004GL021737>
- Lanari R., Berardino P., Bonano M., Casu F., De Luca C., Elefante S., Fusco A., Manunta M., Manzo M., Ojha C. Sentinel-1 results: SBAS-DInSAR processing chain developments and land subsidence analysis // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS-2015). 2015. P. 2836–2839.
- Rodríguez E., Martín J.M. Theory and design of interferometric synthetic-aperture radars // Proc. IEEE. 1992. V. 139. № 2. P. 147–159.
- Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.M. Synthetic aperture radar interferometry // Proc. IEEE. 2000. V. 88. № 3. P. 333–392.
- Torres R., Snoeij P., Geudtner D., Bibby D., Davidson M., Attema E., Potin P., Rommen B., Floury N., Brown M., Navas Traver I., Deghaye P., Duesmann B., Rosich B., Miranda N., Bruno C., L'Abbate M., Croci R., Pietropaolo A., Huchler M., Rostan F. GMES Sentinel-1 mission // Remote Sens. Environ. 2012. V. 120. P. 9–24.

## On The Long-Term Stability of the Norilsk TPP-3 Fuel Tanks Dynamics According to Sentinel-1 SAR Data

A. I. Zakharov<sup>1</sup> and L. N. Zakharova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch, Fryazino, Russia

The results of the interferometric processing and analysis of European spaceborne synthetic aperture radar (SAR) Sentinel-1 acquired over the territory of Norilsk thermal power plant TPP-3 in July 2017–August 2020 are presented. Twelve days differential interferograms allowed the estimation of the stability of all TPP-3 oil reservoirs position with respect to reference knowingly stable targets. Strong distorting influence of meteorological precipitation, as well as freeze-thaw processes of snow covers on the TPP-3 territory on the quality of interferometric phase measurements was noted. It was found that on all the twelve-days interferometric observation intervals from July 2019 to August 2020 made in warm seasons the relative position of all four reservoirs and adjacent territory is stable within the accuracy of about 1.3 mm. According to observations of the reservoirs during July 2017–August 2020 using summer interferograms with one-year interval between images acquisitions, their long-term stability of the position is about 4 mm. We can conclude that the reservoir damage was not caused by areal displacements of the reflecting surfaces in the study area, supposedly, due to the melting of permafrost in the area of the reservoirs.

**Keywords:** Norilsk, fuel storage tank, synthetic aperture radar interferometry, Sentinel-1, corner reflector, surface dynamics

## REFERENCES

- Bamler R., Hartl P.* Synthetic aperture radar interferometry // *Inverse Problems*. 1998. V. 14. P. R1–R54.
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E.* A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002. V. 40. № 11. 2375–2383.
- Bondur V.G.* Aerokosmicheskiye metody i tekhnologii monitoring neftegazonosnyh territoriy i ob'ektov neftegazovogo kompleksa [Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities] // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018.  
<https://doi.org/10.1134/S0001433811090039>
- Bondur V.G., Starchenkov S.A.* Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs of aerospace imagery processing and classification] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*. 2001. № 3. P. 118–143. (In Russian)
- Colesanti C., Ferretti A., Novali F., Prati C., Rocca F.* SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers technique // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003. V. 41. P. 1685–1700.
- Colesanti C., Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Monitoring landslides and tectonic motion with the Permanent Scatterers technique // *Engineering Geology*. 2003. V. 68. P. 3–14.
- Dagurov P.N., Dmitriev A.V., Dobrynin S.I., Zakharov A.I., Chimtdorzhiev T.N.* Radiolokatsionnaya interferometriya sezonnyh deformatsiy pochvy i fazovaya model' obratnogo rassejaniya mikrovoln dvuhslonnoj sredoy s sferohovatyimi granicami [Radar interferometry of the soil's seasonal deformations and the phase model of backscattering of microwaves by a two-layer medium with rough boundaries] // *Optics of atmosphere and ocean*. 2016. V. 29. № 7. P. 585–591.  
<https://doi.org/10.15372/AOO20160709> (In Russian)
- Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A.* A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2011. V. 49. № 9. P. 3460–3470.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent scatterers in SAR interferometry // *Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS-1999)*. 1999. V. 3. P. 1528–1530.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Nonlinear subsidence rate estimation using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2000. V. 38. № 5. P. 2202–2212.
- Goldstein R.M., Werner C.L.* Radar interferogram filtering for geophysical applications // *Geophys. Res. Letters*. 1998. V. 25. № 21. P. 4035–4038.
- Guneriussen T., Hogda K.A., Johnsen H., Lauknes I.* InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* 2001. V. 39. № 10. P. 2101–2108.
- Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B.* A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. № 23. P. L23611.  
<https://doi.org/10.1029/2004GL021737>
- Kobak V.O.* Radiolokatsionnye otrazhateli [Radar reflectors]. M.: Sov. Radio, 1975. 348 p. (In Russian)
- Lanari R., Berardino P., Bonano M., Casu F., De Luca C., Elefante S., Fusco A., Manunta M., Manzo M., Ojha C.* Sentinel-1 results: SBAS-DInSAR processing chain developments and land subsidence analysis // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS-2015)*. 2015. P. 2836–2839.
- Rodríguez E., Martín J.M.* Theory and design of interferometric synthetic-aperture radars // *Proc. IEEE*. 1992. V. 139. № 2. P. 147–159.
- Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.M.* Synthetic aperture radar interferometry // *Proc. IEEE*. 2000. V. 88. № 3. P. 333–392.
- Torres R., Snoeij P., Geudtner D., Bibby D., Davidson M., Attema E., Potin P., Rommen B., Floury N., Brown M., Navas Traver I., Deghaye P., Duesmann B., Rosich B., Miranda N., Bruno C., L'Abbate M., Croci R., Pietropaolo A., Huchler M., Rostan F.* GMES Sentinel-1 mission // *Remote Sens. Environ.* 2012. V. 120. P. 9–24.
- Vasilievskaya V.D.* Pochvoobrazovanie v tundrah Srednej Sibiri [Soils formation in the tundra of Central Siberia]. M.: Nauka, 1980. 236 p. (In Russian)
- Zakharov A.I., Yakovlev O.I., Smirnov V.M.* Sputnikovyy monitoring Zemli: Radiolokatsionnoe zondirovanie poverhnosti [Earth satellite monitoring: Radar sensing of covers.] M.: URSS, 2015. 248 p. (In Russian)
- Zakharov A.I., Zakharova L.N.* Nabljudeniya dinamiki snezhnogo pokrova na radarnykh interferogrammakh L-diapazona [Observation of snow cover dynamics on L-band SAR interferograms]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2017. V. 14. № 7. P. 190–197. (In Russian)
- Zakharov A.I., Zakharova L.N., Krasnogorsky M.G.* Monitoring opolznevoj aktivnosti metodami radarnej interferometrii s pomoshh'yu trehgrannykh ugolkovykh otrazhatel'ey [Monitoring landslide activity by radar interferometry using trihedral corner reflectors] // *Issled. Zemli iz Kosmosa*. 2018. № 3. P. 80–92. (In Russian)
- Zakharov A.I., Zakharova L.N., Mitnik L.M.* Monitoring stabil'nosti toplivnykh rezervuarov Noril'skoj TJeC-3 metodami radarnej interferometrii [Monitoring of the Noril'sk TPP-3 fuel tanks stability by means of radar interferometry technique] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. V. 17. № 5. P. 281–285. (In Russian)
- Zakharova L.N., Zakharov A.I.* Obnaruzhenie dinamiki mostov metodom radiolokatsionnoj interferometrii [Detection of bridges instability by means of SAR interferometry] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. V. 15. № 2. P. 42–51. (In Russian)
- Zakharova L.N., Zakharov A.I.* Nabljudenie dinamiki zony opolznja na reke Bureja po dannym interferometricheskoy sjomki Sentinel-1 v 2017–2018 gg. [Interferometric observation of landslide area dynamics on the Bureya River by means of Sentinel-1 radar data in 2017–2018] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. V. 16. № 2. P. 273–277. (In Russian)

---

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

---

---

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
ВОДОХРАНИЛИЩА ПРОЕКТИРУЕМОЙ ГЭС “КАМБАРАТА-1”  
НА ОСНОВЕ КОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

© 2022 г. А. У. Чымыров<sup>a, b, \*</sup>, Д. Т. Чонтоев<sup>b</sup>, К. Е. Абдрахматов<sup>c</sup>, Б. М. Жакеев<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова,  
Бишкек, Кыргызская Республика

<sup>b</sup>Институт водных проблем и гидроэнергетики, Национальная академия наук Кыргызской Республики,  
Бишкек, Кыргызская Республика

<sup>c</sup>Институт сейсмологии, Национальная академия наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика

\*E-mail: chymyrov@gmail.com

Поступила в редакцию 03.11.2021 г.

Гидроэнергетика играет очень важную роль в социально-экономическом развитии Кыргызстана. Река Нарын формируется в высоких горах внутреннего Тянь-Шаня, протекает по территории Кыргызстана и Узбекистана и имеет одних из самых обширных бассейнов и большой гидроэнергетический потенциал в Центральной Азии. На реке был построен каскад гидроэлектростанций (ГЭС), которые обеспечивают потребности страны в электроэнергии, служат ежегодному и многолетнему регулированию водопользования в регионе. В настоящее время разрабатываются проекты новых ГЭС, в том числе самой большой ГЭС каскада “Камбарата-1” с проектной мощностью 1860 МВт, для увеличения выработки электроэнергии. Будущее водохранилище этой ГЭС требует всестороннего изучения и определения всех параметров для детальной оценки воздействия на окружающую среду, обеспечения надежности и экономической эффективности его строительства и эксплуатации. Ложе будущего водохранилища находится в труднодоступной горной местности, и компьютерное моделирование, расчет его объема и площади зеркала в данной работе выполняются на основе открытых глобальных цифровых моделей местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР) с использованием геоинформационных технологий. Был проведен сравнительный анализ возможностей открытых глобальных ЦММ AW3D30, ЦМР ASTER GDEM V003, GLO-30, SRTM Plus и NASADEM с 30 м пространственным разрешением для применения в гидрологическом моделировании. На основе выбранной ЦММ AW3D30 были определены объемы и площади зеркала водохранилища при разных уровнях воды. Полученные результаты указывают на возможности использования современных ЦММ и ЦМР на основе космических данных в проектировании и эксплуатации водохранилищ в горных условиях Кыргызстана.

**Ключевые слова:** цифровые модели местности, цифровые модели рельефа, AW3D30, ASTER GDEM V003, GLO-30, SRTM Plus, NASADEM, космические данные, водохранилище, ГЭС “Камбарата-1”

**DOI:** 10.31857/S0205961422040030

**ВВЕДЕНИЕ**

Кыргызстан расположен в пределах Тянь-Шанской и Памиро-Алайской горных систем с крупнейшими ледниками, и водные ресурсы являются одним из главных национальных богатств страны. В республике формируются стоки таких крупных рек, как Нарын, Чу, Талас, Сары-Джаз, Карадарья, и других, впадающих в бассейны Сырдарьи и Амударьи и играющих важнейшую роль в жизнедеятельности населения, сельскохозяйственном и промышленном развитии не только в стране, но и в ряде районов Узбекистана, Казахстана, Таджикистана и Китая. На территории страны находится бессточное озеро Иссык-Куль, входящее в

число 30 крупнейших по площади озер мира и занимающее седьмое место в списке самых глубоких озер.

Крупнейшая река Кыргызстана Нарын берет начало в высоких горах внутреннего Тянь-Шаня и питает жаркую засушливую Ферганскую долину. Длина реки 807 км, и площадь бассейна 59 100 км<sup>2</sup>, наибольший расход – 2880 м<sup>3</sup>/с. Гидроэнергетический потенциал реки оценивается в 36.5 млрд кВт · ч/год. Питание реки в верховьях ледниково-снеговое, в среднем течении снегово-ледниково-снеговое. Река протекает по территории Иссык-Кульской, Нарынской, Джалал-Абадской областей Кыргызстана и Наманганской области Узбекистана. При слия-

нии с рекой Карадарья на территории Узбекистана образуется река Сырдарья (Маматканов и др., 2006).

В советское время в Кыргызстане был построен Нарынский каскад гидроэлектростанций — Токтогульская, Курпсайская, Ташкумырская, Шамалдысайская, Учкурганская ГЭС, которые сегодня обеспечивают потребности Кыргызстана в электроэнергии. Проектный режим работы данного каскада связан с годовым и многолетним регулированием стока бассейна реки Нарын с ограничениями по выработке электроэнергии из-за потребностей ирригации нижележащих стран, но в настоящее время он в основном действует в энергетическом режиме (Мубаракшин, 2013; Намазова, 2016; Urmambetova, Chumurov, 2017).

Объектом настоящего исследования является проектируемая ГЭС “Камбарата-1” с проектной мощностью 1860 МВт и среднегодовой выработкой 5.1 ГВт · ч электроэнергии, которая должна стать самой мощной ГЭС Нарынского каскада и всей страны. На участке строительства сооружений ГЭС “Камбарата-1” русло реки представляет собой узкую межгорную долину с крутыми высокими бортами. Плотина гидроэлектростанции проектной высотой 275 м при наполнении водохранилища должна обеспечить нормальный подпорный уровень воды (НПУ) 1198 м над уровнем моря (Düzdaban, 2021). Строительство новой гидроэлектростанции далее позволит перевести Токтогульское водохранилище с проектным объемом 19.5 млрд м<sup>3</sup> на режим многолетнего регулирования для обеспечения продовольственной безопасности и социально-экономического развития стран Центральной Азии (Касымова, 2013; Мубаракшин, 2013).

До начала планируемого строительства этого стратегически важного объекта необходимо детально исследовать и выявить параметры, объемы и площади водохранилища. Первые проекты будущих гидроэлектростанций Нарынского каскада были разработаны в 1970–1980-х гг. и требуют более надежных и современных исследований (Намазова, 2016; Croix, Suyorkulova, 2015). Для решения задач проектирования обычно использовались топографические карты и планы разных масштабов, полученные в результате топографических работ, аэрофото — и космической съемки. Вышеназванные традиционные методы имеют некоторые особенности в обработке и анализе данных, недостатки в точности и оперативности получения данных и высокую стоимость работ. Район строительства и территория будущего водохранилища ГЭС “Камбарата-1” находится в труднодоступной горной местности, поэтому дальнейшие исследования и оценку воздействия строительства станции на окружающую среду можно оперативно и с высокой экономической эффективностью

вести с использованием современных спутниковых снимков разных систем.

Важнейшими современными источниками геопространственной информации сегодня являются открытые цифровые модели местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР). Они представляют собой информационно-математическую модель, которая объединяет в себе модель пространственно-координированных данных о местности и атрибутивные базы данных пространственных объектов данной местности. Цифровые модели местности строятся на точных данных о высоте поверхности земли, включая растительный покров и антропогенные объекты, в то время как цифровые модели рельефа представляют собой “чистую” трехмерную поверхность земли без растений, зданий и других объектов. Часто используемые в настоящее время и доступные глобальные ЦММ и ЦМР создаются, в основном, по данным стереоскопической и радарной космической съемки (Pakoksung, Takagi, 2016; Patel et al., 2016). К ним можно отнести GTOPO30, GMTED2010, SPOT DEM, NextMap World 30, World 3D Topographic Data, WorldDEM и другие модели. Для моделирования будущего водохранилища в настоящей работе были использованы открытые цифровые модели на основе данных спутниковых систем ALOS (Advanced Land Observing Satellite), ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), TanDEM-X и SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (Ашаткин и др., 2020; Kolecka, Kozak, 2014).

Основной целью данного исследования является компьютерное моделирование проектируемого водохранилища ГЭС “Камбарата-1” на основе открытых глобальных ЦММ и ЦМР с использованием геоинформационных систем (ГИС) для исследования его основных параметров. Цифровая модель водохранилища в дальнейшем позволит разработать точные и надежные гидрологические режимы для его безопасной и эффективной эксплуатации.

Возрастающая доступность более точных и качественных ЦММ и ЦМР обуславливает их более широкое применение в решении научных и практических задач в разных областях народного хозяйства. Но в то же время требуется тщательное изучение и сравнительный анализ различных цифровых моделей местности и рельефа на основе данных космической съемки. Изучение имеющихся сравнительных исследований разных цифровых моделей рельефа показало, что сопоставлять данные различных исследований трудно в связи с разными видами сравниваемых моделей и источников данных, особенностями различных проверочных данных, влиянием типов ландшафта и землепользования, а также разностью методики оценки их пространственной точности. Ряд

исследований показал, что ЦММ AW3D30, ЦМР ASTER и SRTM являются наиболее востребованными в научно-практических работах открытыми ЦММ и ЦМР со средним пространственным разрешением в одну угловую секунду или около 30 м на земной поверхности (Мальцев и др., 2018; Drisya, Kumar, 2016; Patel et al., 2016). Эти и другие исследования показывают относительно высокую пространственную точность и высокую эффективность разных ЦММ и ЦМР на разных территориях и регионах мира (Жусупов и др., 2019; Кобзева и др., 2011; Семакова, 2015; Fujita et al., 2008). Но в то же время имеется необходимость исследования пространственной точности и достоверности новых открыто доступных глобальных моделей рельефа для решения гидрологических задач в высокогорных условиях Кыргызстана (Чымыров и др., 2020).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

ГЭС «Камбарата-1» проектируется для строительства в среднем течении реки Нарын с водохранилищем на участке от устья реки Кокирим на востоке до выклинивания водохранилища ГЭС «Камбарата-2» на западе. Русло на начальном отрезке ориентировано, а после впадения р. Кокомерен – субширотно. Наиболее крупными притоками на этой части являются реки Камбарата, Кокомерен, Кокирим и Толук. Все притоки кроме реки Кокомерен являются маловодными. Долина реки Нарын на рассматриваемом участке располагается между хребтами Молдотау и Ферганский на юге и Суусамыртау на севере. На участке строительства сооружений ГЭС «Камбарата-1» русло реки представляет собой узкую межгорную долину с крутыми высокими бортами. На участке намечаемого створа плотины оба борта долины крутые, участками отвесные. Русло реки, шириной в межень 40 и 60–90 м в паводок, здесь сложено валунами и крупной галькой. Среднемноголетний годовой объем стока воды на участке равен 12.48 млрд м<sup>3</sup>, расчетный максимальный расход через сооружения гидроузла с учетом трансформации паводка в водохранилище – 2630 м<sup>3</sup>/с. Сейсмичность района – 9 баллов (Алыбаев, 2017; Абдрахматов и др., 2012).

Картографические материалы и данные разных систем дистанционного зондирования Земли были выбраны для сравнительного изучения в районе исследований, ограниченного по широте от 41°30' с.ш. до 41°54' с.ш. и по долготе от 73°00' в.д. до 74°00' в.д. Сопоставлять данные различных исследований довольно сложно из-за использования разных версий анализируемых ЦММ и ЦМР, разных видов проверочных данных, разных типов ландшафтов и землепользования тестируемых участков, а также разной методики оценки ошибок высот. В данной работе в ка-

честве проверочных данных были использованы отметки в 413 точках, определенные на 4 топографических картах масштаба 1 : 100 000 на район исследований, расположенный в высокогорном регионе Внутреннего Тянь-Шаня (рис. 1).

ЦМР ASTER GDEM V003 был создан по данным, полученным от сенсора ASTER, разработанного Национальным управлением Соединенных Штатов Америки по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA) совместно с Министерством экономики, торговли и промышленности Японии (METI). Сенсор установлен на борту спутника NASA Terra, запущенного 18 декабря 1999 г. Он охватывает широкую спектральную область с помощью 14 диапазонов от видимого до теплового инфракрасного, в высоком пространственном и радиометрическом разрешении. Стереоскопическая съемка ведется с помощью двух телескопов, снимающих в надири и назад в ближнем инфракрасном диапазоне вдоль полосы пролета, с разрешением около 15 м на земной поверхности. Первая версия ASTER GDEM была предоставлена в свободном доступе в 2009 г. Глобальная цифровая модель рельефа третьей версии – ASTER GDEM V003 находится в открытом доступе с 5 августа 2019 года (Чымыров и др., 2020; Courty et al., 2019). Цифровая поверхность Земли между 83° с.ш. и 83° ю.ш. доступны в виде файлов сцен формата GeoTIFF с размерами 1° × 1° и разрешением, равным 1 угловой секунде (примерно 30 м). Эта ЦМР проецирована на эллипсоид Мировой геодезической системы 1984 г. (WGS-84) и основана на гравитационной модели Земли 1996 г.

Глобальная цифровая модель местности ALOS World 3D-30m (AW3D30) с горизонтальным разрешением по широте и долготе в 1 угловую секунду находится в открытом доступе с мая 2015 г. AW3D30 разработана Японским центром технологий дистанционного зондирования (RESTEC), Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA) и корпорацией NTT DATA на основе данных, полученных с японского спутника ALOS с помощью установленной на нем оптико-электронной системы PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping). При создании этой ЦМР использованы более 3 млн космических снимков и благодаря оптической системе с тремя направлениями (прямое, обратное направление и надири) собраны высокоточные данные о самых различных типах местности, включая сложные горные участки поверхности с большой амплитудой высот. Все сенсоры осуществляющего съемку спутника хорошо откалиброваны, поэтому продукт имеет высокую точность геолокации без какой-либо коррекции с использованием опорных точек. Сцены цифровой модели местности AW3D30 в формате GeoTIFF с размерами ячейки на местности 30 м нахо-

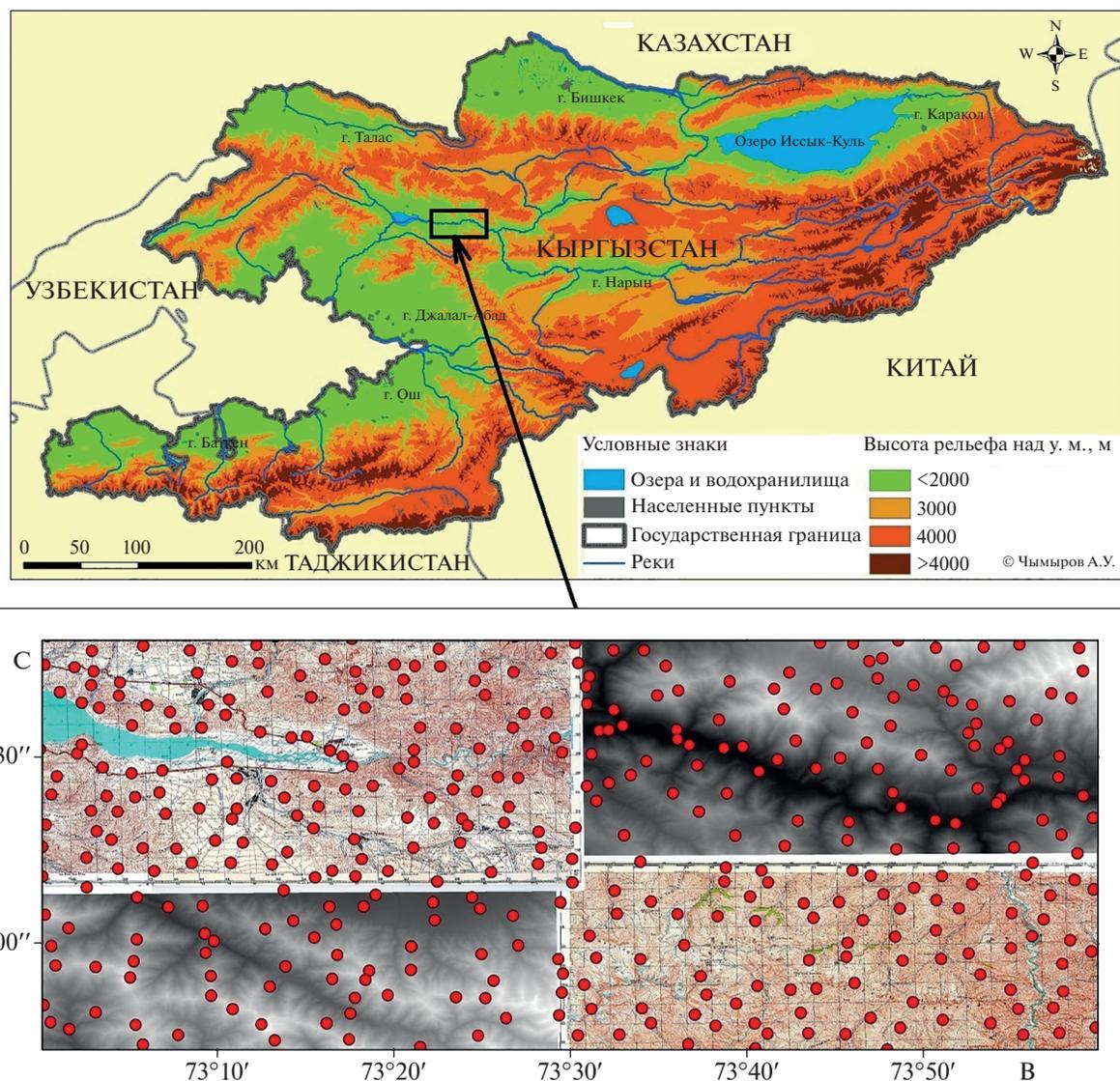


Рис. 1. Район исследований со сценами ЦМР, топографическими картами и опорными точками.

дятся в свободном доступе с 2016 г. Также доступна ее коммерческая версия с 5 м пространственным разрешением (Чымыров и др., 2020; Courty et al., 2019; Jain et al, 2018). Ее вертикальный датум основан на Глобальной гравитационной модели Земли 1996 г. (EGM96).

Открытая цифровая модель рельефа Copernicus DEM GLO-30 с пространственным разрешением 30 м разработана государственно-частным партнерством между Немецким центром аэрокосмических исследований (DLR) и компанией Airbus Defence and Space на основе коммерческой ЦМР WorldDEM. В свою очередь WorldDEM создан по данным глобальной интерферометрической съемки земной поверхности с использованием системы из двух радаров с синтетической апертурой (SAR) в спектральном канале X-диапазона — основ-

ного спутника TanDEM-X и второго аналогичного спутника TerraSAR-X (Rizzoli, 2017). Другая открыто доступная ЦМР Copernicus DEM GLO-90 обеспечивает всемирное покрытие с пространственным разрешением 90 м. Коммерческая версия Copernicus DEM EEA-10 имеет пространственное разрешение, равное 0.4 угловую секунду или около 10 м. Вертикальная система отсчета моделей измеряет высоту рельефа от поверхности Глобальной гравитационной модели Земли 2008 г. (EGM2008) (Marešová, 2021; Hawker, 2018; Purinton, Bookhagen, 2021).

Усовершенствованная односекундная третья версия модели ЦМР SRTM (SRTM Plus или SRTMGL1 V003) в формате GeoTIFF доступна с января 2015 г. через веб-портал Геологической службы США (USGS) и другие источники. Данные для со-

**Таблица 1.** Используемые сцены глобальных цифровых моделей рельефа

Наименования спутника, сенсора и модели	Сцены спутникового снимка	Разрешение, угловая секунда/метр
Спутник Терра (EOS AM-1), сенсор ASTER, модель ASTER GDEM v003	ASTGTMV003_N41E073_dem.tif	1/30
Спутник ALOS, сенсор PRISM, модель ALOS World 3D-30m (AW3D30)	ALPSMLC30_N041E073_DSM.tif	1/30
Спутник TanDEM-X, радар с синтезированной апертурой, модель Copernicus DEM GLO-30	Copernicus_DSM_10_N41_00_E073_00_DEM.tif	1/30
Многоразовый космический корабль Шаттл “Индевор”, миссия SRTM, радары с синтезированной апертурой SIR-C и X-SAR, модель SRTM Plus	N41_E073_1ARC_V3.tif	1/30
Улучшенный ЦМР SRTM с заполнениями пробелов на основе ЦМР ASTER GDEM и AW3D30, модель NASADEM	N41E073.hgt	1/30

здания глобальных моделей SRTM были получены в результате реализации Международного исследовательского проекта Национального управления Соединенных Штатов Америки (США) по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA), Национального агентства геопространственной разведки США (NGA), Итальянского космического агентства (ASI) и Немецкого центра аэрокосмических исследований (DLR). Измерения высоты большей части земной поверхности сенсорами SIR-C/X-SAR (Shuttle Imaging Radar — type C/X-band Synthetic Aperture Radar) проведены в трех каналах радиоволн (L, C и X) в феврале 2000 г. с борта многоразового космического корабля Шаттл “Индевор”. С помощью сенсора X-SAR собраны данные высокого разрешения (1 угловая секунда или примерно 30 м на поверхности Земли), на основе которых создана модель SRTM-X DEM. Первые открытые версии SRTM (версия 1 от 2003 г. и версия 2 от 2005 г.) имели сетки с размером ячейки 3 угловые секунды или около 90 м на земной поверхности (Yue et al., 2017; Courty et al., 2019; Jain et al., 2018).

Цифровая модель рельефа NASADEM создана на основе интерферометрических данных миссии SRTM и связанных с ней продуктов. Усовершенствования в NASADEM были сделаны путем повторной обработки исходных данных необработанных сигналов SRTM с использованием усовершенствованных алгоритмов и включения данных, полученных в основном со спутника с высокоточным геофизическим лазерным альтиметром (GLAS), моделей ASTER GDEM, AW3D30 и по данным спутника измерения толщины льда, облаков и рельефа суши (ICESat). NASADEM опиралась на новейшие методы развертывания и вспомогательные данные, которые не были доступны во время первоначальной обработки данных SRTM (Vaka et al., 2019; Uuemaa et al., 2020). Оптимизированный метод минимизировал пробелы данных и расширил пространственное покрытие модели. Слои продукта данных NASA-

DEM\_HGT включают ЦМР, количество сцен (NUM) и обновленный набор данных SRTM водного объекта (водная маска). Слои NUM указывает количество сцен, которые были обработаны для каждого пикселя с размером 1 угловую секунду, и источник данных. Изображение обзора с низким разрешением, показывающее высоту, также доступно для каждой гранулы NASADEM\_HGT.

Четыре выбранные ЦМР, кроме Copernicus DEM (табл. 1), имеют высоты их поверхностей, вычисленные над гравитационной моделью Земли EGM96. Вертикальная система отсчета Copernicus DEM основана на Глобальной гравитационной модели Земли EGM2008.

Обработка пространственных данных была выполнена с использованием программных комплексов ArcGIS 10.4.1 и GRASS GIS 7.8.3 с созданием баз геоданных. В качестве основной была выбрана зональная система координат WGS\_1984\_UTM\_Zone\_43 (EPSG:32643). Также были использованы геодезическая (Pulkovo\_1942 — EPSG:4284) и зональная (Pulkovo\_1942\_GK\_Zone\_13 — EPSG:28413) системы координат 1942 года или СК-42, что обусловлено использованием топографических карт СССР масштаба 1 : 100000.

Все пять сцен ЦММ и ЦМР были отображены на территорию будущего водохранилища и загружены с веб-порталов разработчиков. Далее они были нанесены на электронную карту и вырезаны для района исследований, ограниченного по широте от 41°30' с.ш. до 41°54' с.ш. и по долготе от 73°00' в.д. до 74°00' в.д. с использованием соответствующих инструментов ГИС.

В данной работе в качестве проверочных данных были использованы высотные отметки 413 опорных точек, оцифрованных на топографических картах масштаба 1 : 100000. Вертикальная точность объектов на топографических картах значительно зависят от пересеченности рельефа местности, графической точности масштаба, точности трансформации координат и горизонталь-

ной привязки отсканированной карты, а также достоверности самих отметок. Согласно проведенным ранее исследованиям вертикальная точность отметок опорных точек на картах соответствующего масштаба может отличаться от 3.9 м на равнинах (уклон от 0 до 20 град.) до 172 м в высокогорных районах с 21 м арифметической средней ошибкой. Такой большой разброс вертикальной точности отметок опорных точек не позволяет их использовать в качестве основного показателя качества ЦМР для высокогорных районов, но они позволяют проводить анализ горизонтального положения элементов гидрографии с точностью  $\pm 27$  м (Бесимбаева и др., 2020; Petrović et al., 2017).

Имеются разные методы оценки точности цифровых моделей рельефа на основе данных дистанционного зондирования. В данной работе расчет точности моделей производился путем вычисления вертикальной средней квадратической ошибки –  $RMSE_v$  (Root Mean Square Error) и арифметической средней абсолютных величин вертикальных ошибок высот сравниваемых поверхностей в опорных точках (Clevers et al., 2009):

$$RMSE_v = \sqrt{\sum_i^n (e_{vi})^2 / n}, \quad (1)$$

где вертикальная ошибка –  $e_{vi} = v_{ri} - v_{mi}$ ,

$v_{ri}$  – относительная проверочная высота опорной  $i$ -ой точки над средним уровнем моря, определенная по топографической карте,

$v_{mi}$  – высота опорной  $i$ -ой точки над средним уровнем моря на поверхности ЦММ/ЦМР,

$n$  – количество опорных точек.

Альтернативной величиной при определении качества вертикальной точности также может служить арифметическая средняя абсолютных величин вертикальных ошибок

$$|\bar{e}_v| = \sum_i^n |\bar{e}_{vi}| / n. \quad (2)$$

Стандартное отклонение вертикальных ошибок определяется по формуле

$$S_v = \sqrt{\sum_i^n (e_{vi} - RMSE_v)^2 / (n - 1)}. \quad (3)$$

Принимая нормальное распределение вертикальных ошибок, доверительные интервалы заданной надежности могут выражаться в виде

$$RMSE_v \pm Z_i (S_v). \quad (4)$$

В этом случае формула для 95% доверительного интервала принимает вид

$$RMSE_v \pm 1.96 (S_v). \quad (5)$$

Если  $RMSE_v$  будет равно нулю, то возможная ошибка с 95% вероятностью будет равна  $\pm 1.96(S_v)$ , а при 90% доверительном интервале она будет равна  $\pm 1.645(S_v)$ . По результатам сравнительного анализа точности проводится выбор наиболее подходящей ЦММ/ЦМР для дальнейшего моделирования водохранилища ГЭС.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Для оценки качества полученных цифровых моделей рельефа были определены высоты поверхностей всех пяти ЦММ и ЦМР в 413 опорных точках для их сравнения с отметками этих точек на топографических картах. Анализ вертикальной точности цифровых моделей показал, что относительная точность ЦММ на основе AW3D30 выше по сравнению с другими моделями, что подтверждается минимальной вертикальной средней квадратической ошибкой ее поверхности (табл. 2). Стандартное отклонение вертикальных ошибок опорных точек на поверхности ЦММ AW3D30 составляет 33.67 м, в этом случае для 95% доверительного интервала вертикальной средней квадратической ошибки точность по этой модели составляет  $33.67 \pm 19.73$  м. Далее по порядку вертикальной точности идут ЦМР GLO-30, NASADEM, SRTM Plus и ASTER GDEM v003. Такие относительно большие вертикальные ошибки ЦММ и ЦМР с 30 м пространственным разрешением можно объяснить горизонтальной неточностью пространственной привязки топографических карт, отрицательным влиянием крутых склонов горных вершин, наличием глубоких ущелий, скалистых вершин с большими углами наклона и сложной экспозиции горных склонов (Чымыров и др., 2020; Козуб, 2018; Courty et al., 2019).

С целью исключения влияния низкой точности проверочных данных в виде высотных отметок 413 опорных точек, полученных на топографических картах, был выполнен сравнительный анализ качества четырех других ЦМР относительно поверхности AW3D30. Статистический анализ полученных параметров показал, что ЦМР GLO-30 имеет минимальные величины вертикальной средней квадратической и вертикальной арифметической средней ошибок. Далее по вертикальной точности идут NASADEM, SRTM Plus и ASTER GDEM v003 (табл. 3).

В качестве цифровой модели рельефа на основе данных дистанционного зондирования Земли для дальнейшего моделирования и определения основных параметров водохранилища принимается ЦММ AW3D30.

Створ плотины будущего ГЭС “Камбарата-1” намечается на реке Нарын примерно в 15 км выше плотины ГЭС “Камбарата-2”, находящейся

**Таблица 2.** Статистические параметры погрешности сравниваемых ЦММ и ЦМР относительно поверхности на топографической карте

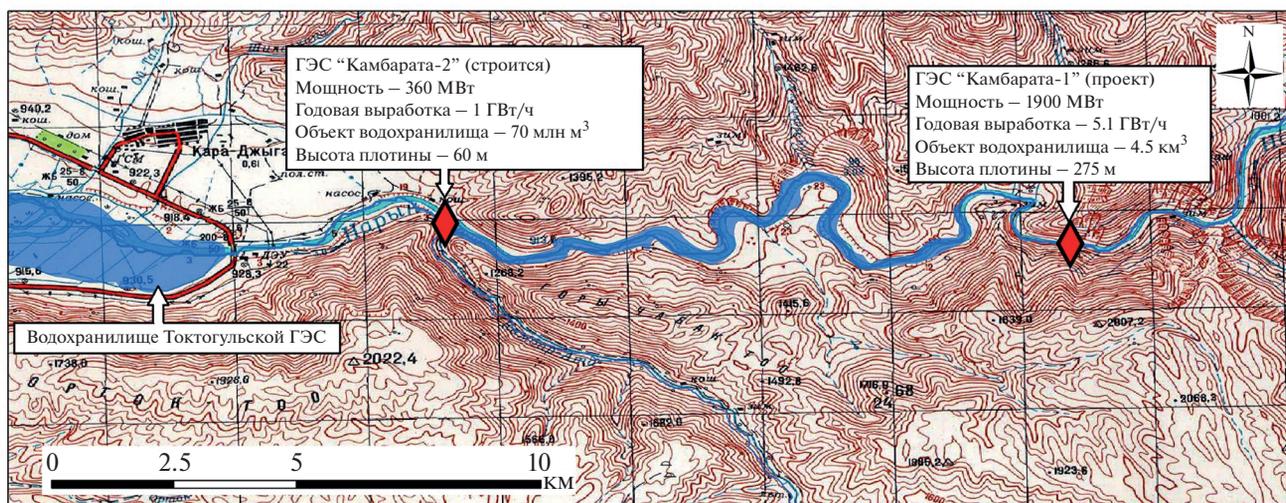
Наименования ЦММ/ЦМР	Вертикальная средняя квадратическая ошибка — $RMSE_v$ , м	Вертикальная арифметическая средняя ошибка — $\bar{e}_v$ , м
ASTER GDEM v003	37.88	30.58
AW3D30	33.67	25.75
GLO-30	34.25	26.64
SRTM Plus	35.29	28.14
NASADEM	34.82	28.08

**Таблица 3.** Статистические параметры погрешности четырех ЦМР относительно поверхности AW3D30

Наименования ЦМР	Вертикальная средняя квадратическая ошибка — $RMSE_v$ , м	Вертикальная арифметическая средняя ошибка — $\bar{e}_v$ , м
ASTER GDEM v003	14.52	3.35
GLO-30	8.44	2.49
SRTM Plus	10.52	2.79
NASADEM	10.07	2.76

на стадии строительства (рис. 2). Грунтовая плотина ГЭС “Камбарата-2”, смешанной конструкции — частично взрыво-набросная, частично насыпная из камня и галечника, была возведена посредством направленного взрыва откоса правого берега в 2009 г. Суммарный расход 3-х агрегатов ГЭС составит  $840 \text{ м}^3/\text{с}$ , а их мощность — 360 МВт. В настоящее время в здании ГЭС “Камбарата-2” установлен и работает гидроагрегат № 1 мощностью 120 МВт. Отметка нормального подпорного уровня (НПУ) водохранилища составляет 955 м, при котором его зеркало доходит до створа плотины ГЭС “Камбарата-1” (Судольский, Алексеевская, 2019; Düzdaban, 2021).

Выше створа плотины ГЭС “Камбарата-1” ширина долины реки Нарын по урезу воды расширяется от 30–60 м до 300–450 м по днищу и около 1500 м на уровне нормального подпорного уровня воды (НПУ). НПУ, при котором наиболее эффективно использование напора воды, находится на высоте 1198 м над уровнем моря, форсированный подпорный уровень (ФПУ) водохранилища доходит до 1200 м. Согласно первоначальному проекту планируется строительство каменно-набросной плотины высотой до 275 м из грунтовых материалов, тело которой или его основная часть могут быть возведены методом направленного взрыва породы или обрушения породы взрывом. В ходе строительства необходимо разработать

**Рис. 2.** Каскад Камбаратинских ГЭС на реке Нарын.

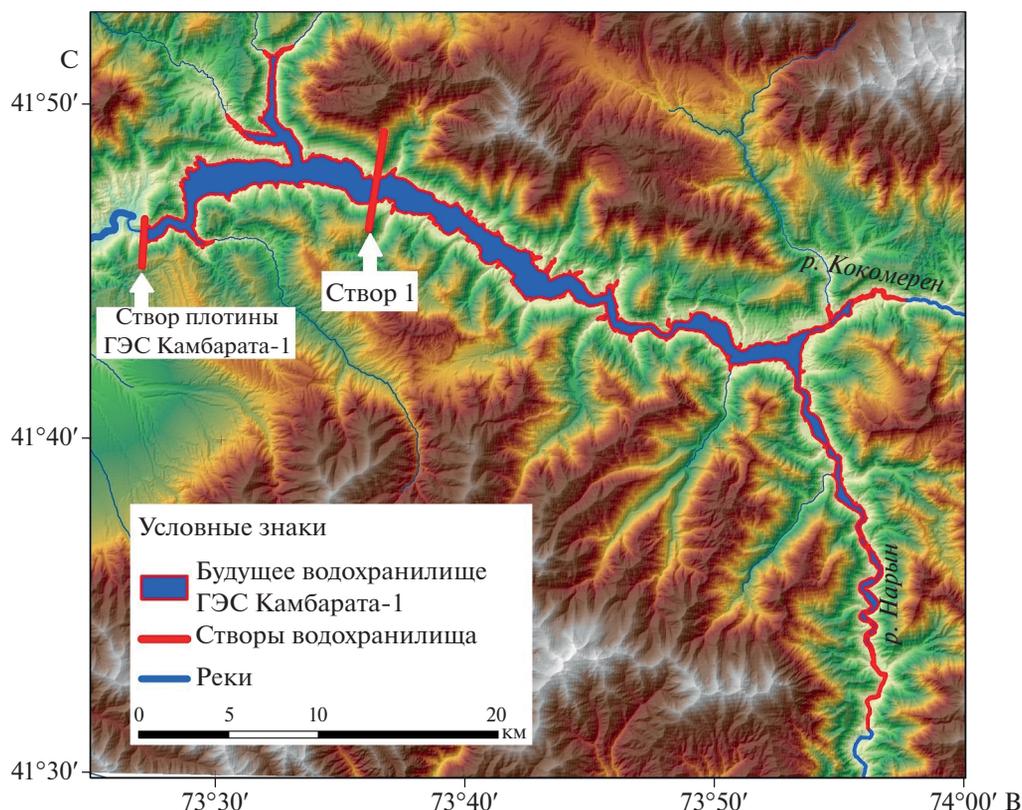


Рис. 3. Цифровая модель будущего водохранилища ГЭС «Камбарата-1».

около 30 млн м<sup>3</sup> скального грунта. В зоне затопления будущего водохранилища отсутствуют дороги, населенные пункты и обрабатываемые сельскохозяйственные земли, что снижает объем экономического ущерба и удешевляет строительство ГЭС.

Поверхность ЦММ AW3D30 была обработана и векторизована с помощью инструментов пространственного анализа и конвертации данных, а также других средств ArcGIS 10.4.1 и GRASS GIS 7.8.3. Горизонталы были проведены через каждые 2 м по высоте рельефа для последующих расчетов объема водохранилища и площади его водного зеркала. Полученная цифровая модель водохранилища показана на рис. 3.

Выполнен предварительный анализ полученных параметров водохранилища на основе ЦММ. Объем водохранилища при НПУ (1198 м) достигнет до 5 млрд м<sup>3</sup>, а площадь водного зеркала составит 58.85 млн м<sup>2</sup> (табл. 4). При достижении проектного уровня мертвого объема (УМО) или горизонта сработки водохранилища остается более 0.6 млрд м<sup>3</sup> воды. При этом предполагается, что полезный объем водохранилища составляет около 4 млрд м<sup>3</sup>. Ширина плотины по урезу воды при ФПУ на высоте 1200 м может превысить 687 м.

На рис. 4 показаны поперечные профили водохранилища по створу плотины и в его средней части.

Созданная цифровая модель водохранилища проектируемой ГЭС «Камбарата-1» позволяет проводить пространственный анализ расположения ложа будущего водоема и определить его объема и площади зеркала воды при разных уровнях первичного заполнения и дальнейшей его эксплуатации. Эта трехмерная модель также может применяться при восстановлении отражательных свойств земной поверхности с учетом уклонов и экспозиции склонов горной местности при применении мультиспектральных спутниковых снимков. Она также может служить в качестве основы для гидрологического моделирования стоков и водосборов с соответствующей пространственной точностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифровую модель местности AW3D30, обладающую наиболее точной поверхностью среди пяти рассматриваемых ЦММ и ЦМР, предпочтительнее использовать для моделирования с пространственным разрешением в 1 угловую секунду или около 30 м и расчетов основных параметров водохранилищ в высокогорных условиях Кыр-

**Таблица 4.** Объем и площадь водного зеркала водохранилища при разных уровнях воды

Примерная высота плотины, м	Уровень воды над уровнем моря, м	Объем, млрд. м <sup>3</sup>	Площадь водного зеркала, млн. м <sup>2</sup>
275	1200 (ФПУ)	5.145	59.905
273	1198 (НПУ)	5.027	58.850
265	1190	4.559	54.999
255	1180	4.027	50.378
245	1170	3.537	46.024
235	1160	3.091	41.893
225	1150	2.685	37.576
215	1140	2.321	33.669
205	1130	1.995	30.482
195	1120	1.699	27.685
185	1110	1.429	25.022
175	1100 (УМО)	1.188	22.589
165	1090	0.971	19.966
155	1080	0.778	17.479
145	1070	0.611	15.060
135	1060	0.467	12.991
125	1050	0.343	10.934
115	1040	0.241	8.937
105	1030	0.159	6.948
95	1020	0.095	5.287
85	1010	0.049	3.516
75	1000	0.020	1.895
65	990	0.004	0.265
55	980	0.002	0.173

гызстана. Исследование показало, что несмотря на то, что AW3D30 является цифровой моделью местности, она имеет лучшую поверхность для дальнейшего моделирования водохранилища и проведения морфометрических исследований. Это можно объяснить не только тем, что все сенсоры осуществляющего съемку спутника ALOS хорошо откалиброваны и данные очищены от посторонних шумов и вибраций, но также и тем, что район исследований является безлесным и не имеет населенных пунктов с высокими зданиями, что также является одним из решающих показателей ЦММ.

Другие рассматриваемые ЦМР можно расположить в следующем порядке с учетом их вертикальной точности и пространственной привязки: GLO-30, NASADEM, SRTM Plus и ASTER GDEM v003. Но качество каждой ЦММ и ЦМР может отличаться в других районах исследований в зависимости от типа рельефа, наличия растительности и населенных пунктов, точности пространственной привязки спутниковых изображений, принятого вертикального датума и других

факторов. Топографические карты на бумажной основе могут иметь неприемлемую точность в качестве источника проверочных данных из-за больших ошибок их пространственной привязки и деформаций. Измерение координат опорных точек на местности с помощью спутникового позиционирования становится основным источником получения проверочных данных.

Трехмерные цифровые модели местности или рельефа также могут применяться при восстановлении отражательных свойств земной поверхности с учетом уклонов и экспозиции склонов горной местности при применении мультиспектральных спутниковых снимков. Она также может служить в качестве основы для гидрологического моделирования стоков и водосборов с соответствующей пространственной точностью.

Созданная цифровая модель водохранилища проектируемого ГЭС «Камбарата-1» дает возможность проводить пространственный анализ существующего ложа будущего водоема и определять его объема и площади зеркала при разных

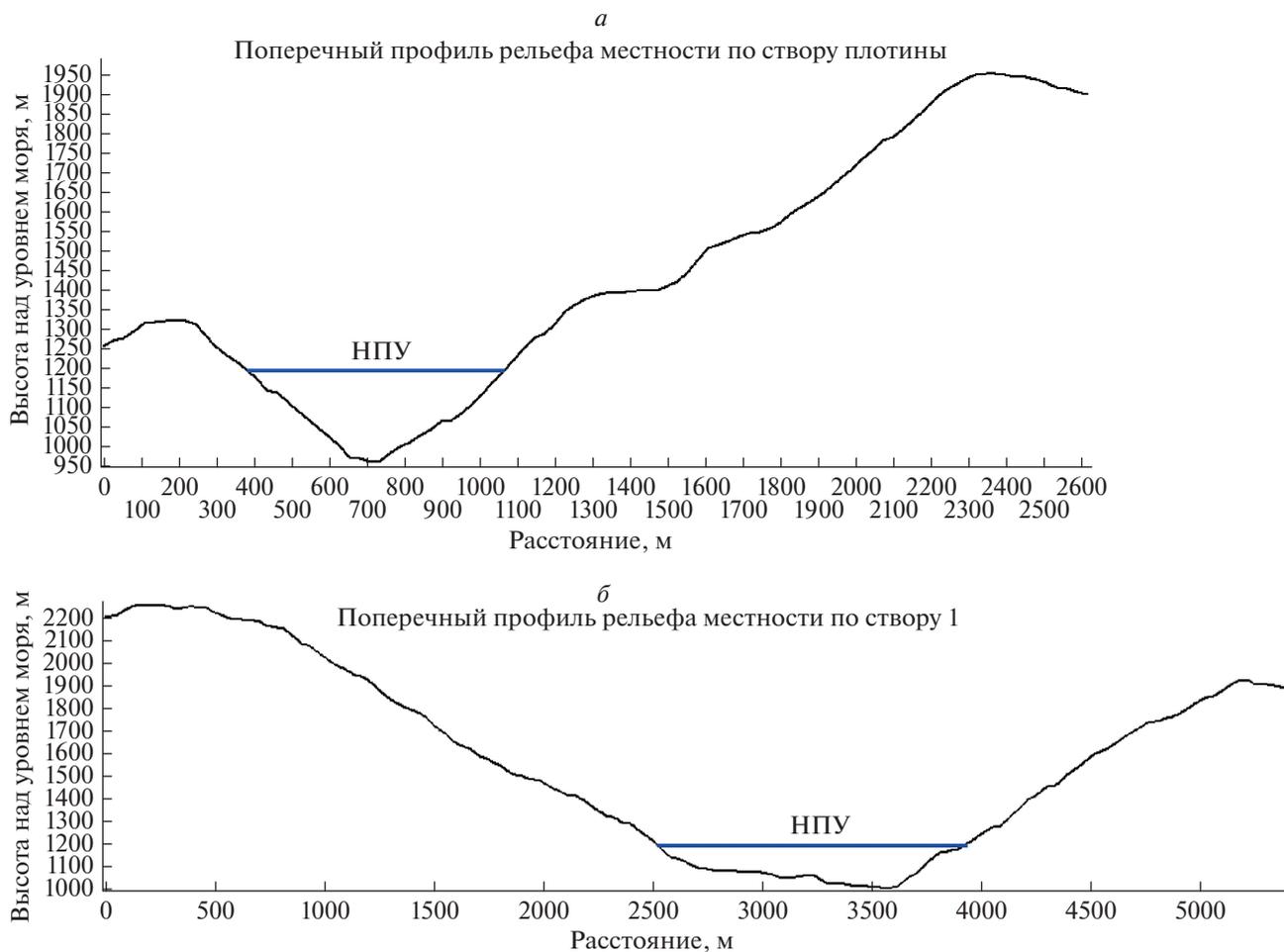


Рис. 4. Поперечные профили водохранилища (вид вверх по руслу реки): а – по створу плотины ГЭС; б – по створу 1 на рис. 3.

уровнях первичного заполнения и эксплуатации. Полученные параметры водохранилища позволяют их применение для дальнейших расчетов и оценки его влияния на окружающую среду и выявления возможных геоэкологических рисков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдрахматов К.Е., Джанузакоев К.Д., Фролова А.Г., Погребной В.Н. Карта сейсмического районирования территории Кыргызской Республики. Бишкек. 2012. 51 с.
- Алыбаев Н.К. Составление водно-энергетического баланса и его прогнозирование // Проблемы автоматизации и управления. 2017. № 1(32). С. 43–49.
- Ашаткин И.А., Мальцев К.А., Гайнутдинова Г.Ф., Усманов Б.М., Гафуров А.М., Ганиева А.Ф., Мальцева Т.С., Гиззатуллина Э.Р. Анализ морфометрии рельефа по глобальным ЦМР в пределах южной части европейской территории России // Записки Горного института. 2020. Т. 162, кн. 4. С. 612–628. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.4.612-628>
- Бесимбаева О.Г., Ярцева В.Ф., Хмырова Е.Н., Синяк Р.В. Анализ возникновения погрешностей при создании и

обновлении цифровых топографических карт // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2020. № 2(30). С. 62–71.

Жусупов Н.А., Ха Т.В., Дахал Т.П., Ашыралиев Т.А., Бактыбек уулу М. Оценка точности открытых глобальных цифровых моделей рельефа // Вестник КРСУ. 2019. Т. 19. № 8. С. 135–139.

Касымова В.М. Состояние и перспективы сотрудничества Российской Федерации и Кыргызской Республики в сфере энергетики по обеспечению энергетической безопасности в Центральной Азии // Реформа. 2013. № 2(58). С. 47–53.

Кобзева Е.А. Использование фотограмметрических методов создания 3D моделей при проектировании водохранилищ // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2011. Т. 4. С. 3–6.

Козуб Ю.И. Повышение точности цифровой модели рельефа для целей ландшафтного картографирования на территорию Республики Дагестан // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2018. Т. 12. № 3. С. 96–102. <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2018-12-3-96-102>

- Мальцев К.А., Голосов В.Н., Гафуров А.М.* Цифровые модели рельефа и их использование в расчетах темпов смыва почв на пахотных землях // Ученые записки Казанского Университета. Серия естественные науки. 2018. Т. 160, кн. 3. С. 514–530.
- Маматканов Д.М., Бажанова Л.В., Романовский В.В.* Водные ресурсы Кыргызстана на современном этапе. Бишкек: Илим, 2006. 276 с.
- Мубаракишин Б.Н.* Гидроэнергетика Киргизии в контексте решения водно-энергетических проблем Центральной Азии // Вестник МГИМО-Университета. 2013. № 1(28). С. 113–117. <https://doi.org/10.24833/2071-8160-2013-1-28-113-117>
- Намазова Э.О.* Анализ перспектив действующих проектов в энергетической отрасли Кыргызской Республики // Научный альманах. 2016. № 4-1(18). С. 165–167. <https://doi.org/10.17117/na.2016.04.01.165>
- Семакова Э.Р.* Предварительные результаты построения цифровой модели рельефа для некоторых районов Центрального и Западного Тянь-Шаня // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. № 4(1). С. 99–103.
- Судольский Г.А., Алексеевская М.В.* Гидравлические исследования по обоснованию конструкции берегового водосброса Камбаратинской ГЭС-2 // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 292. С. 3–12.
- Чымыров А.У., Чонтоев Д.Т., Жакеев Б.М.* Создание цифровых моделей рельефа на основе открытых данных дистанционного зондирования Земли при уточнении границ бассейнов рек в котловине озера Иссык-Куль // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2020. Т. 26, ч. 2. С. 349–365. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-2-26-349-365>
- Clevers J.G.P.W., Congalton R.G., Green K.* Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data—Principles and Practices (Second edition) // International J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2009. V. 11. P. 448–449. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.07.002>
- Courty L.G., Soriano Monzalvo J.C., Pedrozo-Acuña A.* Evaluation of open-access global digital elevation models (AW3D30, SRTM, and ASTER) for flood modelling purposes // J. Flood Risk Management. 2019. V. 12 (Suppl. 1): e12550. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12550>
- Drisy J., Kumar D.S.* Comparison of digitally delineated stream networks from different spaceborne digital elevation models: A case study based on two watersheds in South India // Arabian J. Geosciences. 2016. V. 9:710. P. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2726-x>
- Düzdaban E.* Water issue in Central Asia: Challenges and opportunities // Eurasian Research J. 2021. V. 3. № 1. P. 45–62.
- Fujita K., Suzuki R., Nuimura T., Sakai A.* Performance of ASTER and SRTM DEMs, and their potential for assessing glacial lakes in the Lunana region, Bhutan Himalaya // J. Glaciology. V. 54. Iss. 185. 2008. P. 220–228. <https://doi.org/10.3189/002214308784886162>
- Jain A.O., Thaker T., Chaurasia A., Patel P., Singh A.K.* Vertical accuracy evaluation of SRTM-GL1, GDEM-V2, AW3D30 and CartoDEM-V3.1 of 30-m resolution with dual frequency GNSS for lower Tapi Basin India // Geocarto International. 2018. V. 33. P. 1237–1256. <https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1343392>
- Kolecka N., Kozak J.* Assessment of the Accuracy of SRTM C – and X-Band High Mountain Elevation Data: a Case Study of the Polish Tatra Mountains // Pure Appl. Geophys. 2014. V. 171. P. 897–912. <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0695-5>
- Marešová J., Gdulová K., Pracná P., Moravec D., Gábor L., Prošek J., Barták V., Moudrý V.* Applicability of Data Acquisition Characteristics to the Identification of Local Artefacts in Global Digital Elevation Models: Comparison of the Copernicus and TanDEM-X DEMs // Remote Sens. 2021. V. 13:3931. <https://doi.org/10.3390/rs13193931>
- Pakoksung K., Takagi M.* Digital elevation models on accuracy validation and bias correction in vertical // Model. Earth Syst. Environ. 2016. V. 2. Iss. 1:11. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0069-3>
- Patel A., Katiyar K.S., Prasad V.* Performances evaluation of different open source DEM using differential global positioning system (DGPS) // Egypt. J. Remote. Sens. Space Sci. 2016. V. 19. Iss. 1. P. 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.12.004>
- Petrović V., Borisov M., Zlatanović D., Ignjatović L.* Vertical accuracy of data on the topographic maps and their application in mining // Engineering and Mining J. 2017. <https://doi.org/10.5937/mmeb1704039P>
- Purinton B., Bookhagen B.* Beyond Vertical Point Accuracy: Assessing Inter-pixel Consistency in 30 m Global DEMs for the Arid Central Andes // Frontiers in Earth Science. 2021. V. 9. P. 901. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.758606>
- Rizzoli P., Martone M., Gonzalez C., Wecklich Ch., Borla Tridon D., Bräutigam B, Bachmann M., Schulze D., Fritz T. Huber M., Wessel B., Krieger G., Zink M. Moreira A.* Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 132. 2017. P. 119–139. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008>
- Urmambetova T., Chymyrov A.* Geoenvironmental Impact Studies for Hydro-Energy Projects: Naryn River in Kyrgyzstan // Studia Universitatis Babeş-Bolyai Geographia. 2017. V. 62. Iss. 1. P. 59–66. <https://doi.org/10.24193/subbgeogr.2017.1.04>
- Uuemaa E., Ahi S., Montibeller B., Muru M., Kmoch A.* Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM) // Remote Sens. 2020. V. 12:3482. <https://doi.org/10.3390/rs12213482>
- Vaka D.S., Kumar V., Rao Y.S., Deo R.* Comparison of Various DEMs for Height Accuracy Assessment Over Different Terrains of India // IGARSS 2019 – 2019, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. July 28–August 2, 2019, Yokohama, Japan. P. 1998–2001. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898492>
- Yue L., Shen H., Zhang L., Zheng X., Zhang F., Yuan Q.* High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. V. 123. P. 20–34. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.11.002>

## Modeling and Study of Parameters of the Under-Construction Kambarata-1 HPP Reservoir on Base of Satellite Data

A. U. Chymyrov<sup>1</sup>, D. T. Chontoev<sup>2</sup>, K. E. Abdrakhmatov<sup>3</sup>, and B. M. Zhakeev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kyrgyz state university of construction, transport and architecture (KSUCTA) named after N. Isanov, Bishkek, Kyrgyz Republic

<sup>2</sup>Institute of water problems and hydropower, National academy of sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic

<sup>3</sup>Institute of seismology, National academy of sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic

Hydropower plays a very important role in the socio-economic development of Kyrgyzstan. The Naryn River forms in the high mountains of the Inner Tien Shan, flows through the territory of Kyrgyzstan and Uzbekistan and has one of the most extensive basins and great hydropower potential in Central Asia. A cascade of Hydroelectric Power Plants (HPP) has been built on the river to satisfy the country's needs for energy, to provide annual and long-term regulation of water use in the region. Currently, projects are being developed for new HPPs, including the Kambarata-1 Hydroelectric Power Plant – the largest HPP in the cascade with designed capacity of 1.860 MW, to increase electricity generation in the country. The future reservoir site of this HPP requires a comprehensive study and determination of all parameters for a detailed assessment of the impact on the environment, ensuring the reliability and economic efficiency of its construction and operation. The future reservoir bed is located in a remote mountainous area and digital modeling, the calculation of its volume and water surface area are carried out in this work on base of the open global Digital Surface (DSM) and Elevation Models (DEM) using geoinformation technologies. A comparative analysis of the performances of the open global AW3D30 DSM, ASTER GDEM V003, GLO-30, SRTM Plus and NASADEM with 30 m spatial resolution for use in hydrological modeling was carried out. Based on the selected AW3D30 DSM, the volumes and water surface area of the reservoir were determined at different water levels. The results obtained indicate the possibility of using modern DSM and DEM, based on remote sensing data, in the design and operation of reservoirs in the mountainous conditions of Kyrgyzstan.

**Keywords:** digital surface model, digital elevation model, AW3D30, ASTER GDEM V003, GLO-30, SRTM Plus, NASADEM, satellite data, reservoir, Kambarata-1 HPP

### REFERENCES

- Abdrakhmatov K.E., Dzhanuzakov K.D., Frolova A.G., Pogrebnoj V.N.* Karta sejsmicheskogo rajonirovaniya territorii Kyrgyzskoj Respubliki [The seismic zoning map of the Kyrgyz Republic]. Bishkek. 2012. 51 p. (in Russian).
- Alybaev N.K.* Sostavlenie vodno-energeticheskogo balansa i ego prognozirovanie [Drawing up water and energy balance and its forecasting] // Problemy avtomatiki i upravleniya. 2017. № 1(32). P. 43–49. (in Russian).
- Ashatkin I.A., Maltsev K.A., Gainutdinova G.F., Usmanov B.M., Gafurov A.M., Ganieva A.F., Maltseva T.S., Gizzatullina E.R.* Analiz morfometrii rel'efa po global'nym CMR v predelakh juzhnoj chasti evropejskoj territorii Rossii [Analysis of relief morphometry by global DEM in the southern part of the European territory of Russia] // Zapiski Gornogo instituta. 2020. V. 162. № 4. P. 612–628. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.4.612-628> (in Russian).
- Besimbaeva O.G., Jartseva V.F., Khmyrova E.N., Sinjak R.V.* Analiz voznikoveniya pogreshnostej pri sozdanii i obnovlenii cifrovih topograficheskikh kart [Analysis of the occurrence of errors in the creation and updating of digital topographic maps] // Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tehnologij). 2020. № 2(30). P. 62–71. (in Russian).
- Chymyrov A.U., Chontoev D.T., Zhakeev B.M.* Cozdanie cifrovih modelej rel'efa na osnove otkrytyh dannih distancionnogo zondirovaniya Zemli pri utocnhenii granic bassejnov rek v kotlovine ozera Issyk-Kul' [Creation of the digital relief models based on open remote sensing data for improvement the borders of river basins in the Issyk-Kul lake cavity] // InterKarto. InterGIS. 2020. V. 26, ch. 2. P. 349–365. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-2-26-349-365> (in Russian).
- Clevers J.G.P.W., Congalton R.G., Green K.* Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data – Principles and Practices (Second edition) // International J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2009. V. 11. P. 448–449. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.07.002>
- Courty L.G., Soriano Monzalvo J.C., Pedrozo-Acuña A.* Evaluation of open-access global digital elevation models (AW3D30, SRTM, and ASTER) for flood modelling purposes // J. Flood Risk Management. 2019. V. 12 (Suppl. 1): e12550. DOI 10.1111/jfr3.12550
- Drisya J., Kumar D.S.* Comparison of digitally delineated stream networks from different spaceborne digital elevation models: A case study based on two watersheds in South India // Arabian J. Geosciences. 2016. V. 9:710. P. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2726-x>
- Düzdaban E.* Water issue in Central Asia: Challenges and opportunities // Eurasian Research J. 2021. V. 3. № 1. P. 45–62.
- Fujita K., Suzuki R., Nuimura T., Sakai A.* Performance of ASTER and SRTM DEMs, and their potential for assessing glacial lakes in the Lunana region, Bhutan Himalaya // J. Glaciology. V. 54. Iss. 185. 2008. P. 220–228. <https://doi.org/10.3189/002214308784886162>
- Jain A.O., Thaker T., Chaurasia A., Patel P., Singh A.K.* Vertical accuracy evaluation of SRTM-GL1, GDEM-V2, AW3D30 and CartoDEM-V3.1 of 30-m resolution with dual frequency GNSS for lower Tapi Basin India // Geocarto International. 2018. V. 33. P. 1237–1256. <https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1343392>

- Kasymova V.M.* Sostojanie i perspektivy sotrudnichestva Rossijskoj Federacii i Kyrgyzskoj Respubliki v sfere jenergetiki po obespečeniju jenergetičeskoj bezopasnosti v Central'noj Azii [Status and prospects of cooperation between the Russian Federation and the Kyrgyz Republic in the field of energy to ensure energy security in Central Asia] // *Reforma*. 2013. № 2(58). P. 47–53. (in Russian).
- Kobzeva E.A.* Ispol'zovanie fotogrammetricheskikh metodov sozdaniya 3D modelej pri proektirovanii vodohranilishh [The use of photogrammetric methods for creating 3D models in the design of reservoirs] // *Interjekspo Geo-Sibir'*. 2011. V. 4. P. 3–6. (in Russian).
- Kolecka N., Kozak J.* Assessment of the Accuracy of SRTM C – and X-Band High Mountain Elevation Data: a Case Study of the Polish Tatra Mountains // *Pure Appl. Geophys.* 2014. V. 171. P. 897–912.  
<https://doi.org/10.1007/s00024-013-0695-5>
- Kozub J.I.* Povyshenie tochnosti cifrovoj modeli rel'efa dlja celej landshaftnogo kartografirovanija na territoriju Respubliki Dagestan [Improving the accuracy of the digital elevation model for the purposes of landscape mapping on the territory of the Republic of Dagestan] // *Izvestija Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogičeskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki*. 2018. V. 12. № 3. P. 96–102.  
<https://doi.org/10.31161/1995-0675-2018-12-3-96-102> (in Russian).
- Maltsev K.A., Golosov V.N., Gafurov A.M.* Cifrovye modeli rel'efa i ih ispol'zovanie v raschjotah tempov smyva pochv na pahotnyh zemljah [Digital elevation models and their use in calculating soil washout rates on arable land] // *Uchenye zapiski Kazanskogo Universiteta. Serija estestvennye nauki*. 2018. V. 160, kn. 3. P. 514–530. (in Russian).
- Mamatkanov D.M., Bazhanova L.V., Romanovskij V.V.* Vodnye resursy Kyrgyzstana na sovremennom jetape [Water resources of Kyrgyzstan at the present stage]. Bishkek: Ilim. 2006. 276 p. (in Russian).
- Marešová J., Gdulová K., Pracná P., Moravec D., Gábor L., Prošek J., Barták V., Moudrý V.* Applicability of Data Acquisition Characteristics to the Identification of Local Artefacts in Global Digital Elevation Models: Comparison of the Copernicus and TanDEM-X DEMs // *Remote Sens.* 2021. V. 13:3931.  
<https://doi.org/10.3390/rs13193931>
- Mubarakshin B.N.* Hidrojenergetika Kirgizii v kontekste reshenija vodno-jenergetičeskikh problem Central'noj Azii [Hydropower Sector of Kyrgyzstan in the Context of Solving the Water–Energy Problems in the Central Asia] // *Vestnik MGIMO-Universiteta*. 2013. № 1(28). P. 113–117.  
<https://doi.org/10.24833/2071-8160-2013-1-28-113-117> (in Russian).
- Namazova Je.O.* Analiz perspektiv dejstvujushhijh proektov v jenergetičeskoj otrasli Kyrgyzskoj Respubliki [Analysis of the prospects of existing projects in the energy sector of the Kyrgyz Republic] // *Nauchnyj al'manah*. 2016. № 4-1(18). P. 165–167.  
<https://doi.org/10.17117/na.2016.04.01.165> (in Russian).
- Pakoksung K., Takagi M.* Digital elevation models on accuracy validation and bias correction in vertical // *Model. Earth Syst. Environ.* 2016. V. 2. Iss. 1:11.  
<https://doi.org/10.1007/s40808-015-0069-3>
- Patel A., Katiyar K.S., Prasad V.* Performances evaluation of different open source DEM using differential global positioning system (DGPS) // *Egypt. J. Remote. Sens. Space Sci.* 2016. V. 19. Iss. 1. P. 7–16.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.12.004>
- Petrović V., Borisov M., Zlatanović D., Ignjatović L.* Vertical accuracy of data on the topographic maps and their application in mining // *Engineering and Mining J.* 2017.  
<https://doi.org/10.5937/mmeb1704039P>
- Purinton B., Bookhagen B.* Beyond Vertical Point Accuracy: Assessing Inter-pixel Consistency in 30 m Global DEMs for the Arid Central Andes // *Frontiers in Earth Science*. 2021. V. 9. P. 901.  
<https://doi.org/10.3389/feart.2021.758606>
- Rizzoli P., Martone M., Gonzalez C., Wecklich Ch., Borla Tridon D., Bräutigam B, Bachmann M., Schulze D., Fritz T. Huber M., Wessel B., Krieger G., Zink M. Moreira A.* Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 132. 2017. P. 119–139.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008>
- Semakova Je.R.* Predvaritel'nye rezul'taty postroenija cifrovoj modeli rel'efa dlja nekotoryh rajonov Central'nogo i Zapadnogo Tjan'-Shanja [Preliminary results of creating a digital elevation model for some areas of the Central and Western Tien Shan] // *Interjekspo Geo-Sibir'*. 2015. № 4(1). P. 99–103. (in Russian).
- Sudol'skij G.A., Alekseevskaja M.V.* Gidravličeskie issledovanija po obosnovaniju konstrukcii beregovogo vodobrosa Kambaratinskoj GJeS-2 [Hydraulic studies to substantiate the design of the coastal spillway of the Kambarata HPP-2] // *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva*. 2019. V. 292. P. 3–12. (in Russian).
- Urmambetova T., Chymyrov A.* Geoenvironmental Impact Studies for Hydro-Energy Projects: Naryn River in Kyrgyzstan // *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Geographia*. 2017. V. 62. Iss. 1. P. 59–66.  
<https://doi.org/10.24193/subbgeogr.2017.1.04>
- Uuemaa E., Ahi S., Montibeller B., Muru M., Kmoch A.* Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM) // *Remote Sens.* 2020. V. 12:3482.  
<https://doi.org/10.3390/rs12213482>
- Vaka D.S., Kumar V., Rao Y.S., Deo R.* Comparison of Various DEMs for Height Accuracy Assessment Over Different Terrains of India // *IGARSS 2019 – 2019, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. July 28–August 2, 2019, Yokohama, Japan. P. 1998–2001.  
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898492>
- Yue L., Shen H., Zhang L., Zheng X., Zhang F., Yuan Q.* High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. V. 123. P. 20–34.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.11.002>
- Zhusupov N.A., Ha T.V., Dahal T.P., Ashryaliev T.A., Baktybek uulu M.* Ocenka tochnosti otkrytyh global'nyh cifrovyyh modelej rel'efa [Quality assessment of openly accessible global DEMs] // *Vestnik KRSU*. 2019. V. 19. № 8. P. 135–139. (in Russian).

---

---

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

---

---

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В СТОЛБЕ  
АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ КА ЭЛЕКТРО-Л № 3  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**© 2022 г. В. Д. Блощинский<sup>а</sup> \*, М. О. Кучма<sup>а</sup>, А. В. Кухарский<sup>б</sup><sup>а</sup>Дальневосточный центр Федерального государственного бюджетного учреждения

"Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета", Хабаровск, Россия

<sup>б</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение "Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета", Москва, Россия

\*E-mail: v.bloshchinsky@dvrpod.ru

Поступила в редакцию 22.11.2021 г.

В работе рассматривается метод оценки общего содержания озона в столбе атмосферы на основе искусственных нейронных сетей по данным прибора МСУ-ГС геостационарного космического аппарата Электро-Л № 3. Проведенные тесты и сравнения восстановленных значений общего содержания озона по данным МСУ-ГС с данными наземных измерений из архивов AERONET и WOUDC, а также со спутниковыми оценками по данным прибора OMPS показали высокую корреляцию и точность. Средняя абсолютная ошибка при сравнении с OMPS составила 1.9 DU, с AERONET – 13.4, с WOUDC – 15.7, а корреляция – 99.8, 89.6 и 86.9% соответственно. Полученные результаты говорят о хорошей точности и эффективности предложенного метода оценки общего содержания озона.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование Земли, МСУ-ГС, Электро-Л, газ, озон, искусственная нейронная сеть

DOI: 10.31857/S0205961422040029

**ВВЕДЕНИЕ**

Озон – один из важнейших газовых компонентов атмосферы. Он способствует парниковому эффекту в тропосфере, участвует в нагреве стратосферы, а его высокая концентрация у поверхности Земли может быть токсична. Изучение пространственно-временных изменений содержания озона в атмосфере – важная проблема, связанная с его значительным влиянием на климат и уровень ультрафиолетового (УФ) излучения у поверхности Земли.

В настоящее время региональный и глобальный мониторинг состояния озонового слоя проводится как по данным *in situ*, так и по данным измерений космических аппаратов (КА). Наземные озонометрические станции дают наиболее точные данные о содержании озона в столбе атмосферы, но получить с них полную информацию о пространственном распределении озона не предоставляется возможным, так как они расположены неравномерно: большая часть станций находится в Западной и Центральной Европе, заметно меньше станций в Северной Америке, по несколько станций в Индии, Китае и Японии, и совсем мало в Южном полушарии. Этого недостатка лишены спутниковые оценки общего содержания озона (ОСО) или количества озона в вертикальном столбе от поверхности Земли до верхней границы атмосферы.

Значительный объем информации о содержании озона получают на основе данных дистанционного зондирования Земли с помощью трех методов пассивного зондирования: метода солнечного просвечивания, также называемого затменным методом, и методов с использованием собственного излучения атмосферы или рассеянного солнечного излучения (Hassler et al., 2014).

Традиционно общее содержание озона определяется с использованием обратного рассеянного УФ излучения Солнца. Это связано с тем, что ОСО изменяется обратно пропорционально УФ-излучению, большая часть которого поглощается в стратосфере, где находится около 90% озона. Примерами инструментов для мониторинга озона, которые измеряют уходящее УФ-излучение, являются: TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) (McPeters et al., 1998), OMI (Ozone Monitoring Instrument) (Veefkind et al., 2006), OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite) (McPeters et al., 2019).

Помимо такого подхода были разработаны технологии определения ОСО в спектрах инфракрасного излучения. Например, с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) были получены оценки общего содержания озона по данным приборов ИКФС-2 (Инфракрасный Фурье-Спектрометр) со средним смещением 3–5% (Timofeyev et al., 2019) и IASI (Infrared Atmospheric

Sounding Interferometer) со средним смещением 3–4% (Turqueti et al., 2004).

Описанные выше подходы применяются в основном для полярно-орбитальных КА, которые имеют некоторые ограничения для определения ОСО. Так УФ-датчики способны обеспечить информацию об общем содержании озона только в дневное время суток с малой временной дискретностью, как правило, один раз в сутки над определенной территорией. ИК-гиперспектрометры обладают схожей с УФ-датчиками временной дискретностью, однако могут проводить измерения, как днем так и ночью. В то же время приборы, установленные на геостационарных КА лишены указанных недостатков. Преимущество спутников такого типа – большое пространственное покрытие исследуемой территории с высокой временной дискретностью поступающей информации. Имеются исследовательские работы по определению ОСО по данным геостационарных космических аппаратов. Например, по данным прибора ABI (Advanced Baseline Imager) КА GOES на основе метода статистической регрессии проведена оценка общего содержания озона с отклонением около 4.6% по сравнению с данными TOMS (Li et al., 2007). Также осуществлено определение ОСО в столбе атмосферы с помощью регрессии с моделированием спектральной яркости ABI и использованием данных SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) КА Meteosat 8 (Jin et al., 2008; Schmidt, Hoffman, 2010). Дополнительное использование в этих работах вертикального профиля температуры в качестве одного из признаков для оценки ОСО позволило улучшить точность получаемых оценок за счет корреляции между стратосферной температурой и озоном. Также с помощью ИНС была осуществлена попытка определения общего содержания озона по инфракрасным измерениям SEVIRI (Polyakov, Timofeev, 2008). Данный подход показал отклонение в 6.5% по сравнению с озонометрическими станциями. Для прибора АНИ КА Himawari был предложен физический подход к решению вопроса по определению ОСО, использующий модель переноса излучения RTTOV (Radiative Transfer for TOVs) (Lee et al., 2019). Данный метод позволяет восстановить общее содержание озона для безоблачных областей с отклонением около 2.3% по сравнению с данными ОМІ и примерно 3% по сравнению с измерениями озонозондов. Минусом такого подхода является использование первого приближения наблюдений, которые состояются по климатическим данным и дневным измерениям ОМІ. Ранее был рассмотрен подход к определению ОСО для прибора МСУ-ГС (Многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения), установленном на КА Электро-Л № 1, основывающийся на статистической регрессии (Крамчанинова, Успенский, 2013). Также разработана технология восстановления значений общего содержания озона по данным прибора МСУ-ГС КА Электро-Л № 2 с применением ИНС (Roshydromet,

2019) с среднеквадратическим отклонением в 21 DU по сравнению с ОМІ.

Авторами настоящей работы был рассмотрен метод определения ОСО для безоблачной атмосферы, основывающийся на применении искусственной нейронной сети, которая в качестве входных данных использует значения яркостной температуры, регистрируемой в инфракрасных каналах прибора МСУ-ГС с геостационарного КА Электро-Л № 3, и данные о параметрах атмосферы (вертикальный профиль температуры и приземное давление) из численной модели прогноза GFS NCEP (Global Forecast System National Centers for Environmental Prediction).

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ МСУ-ГС

Прибор МСУ-ГС позволяет измерять уходящее излучение всего диска Земли в видимом (3 канала с разрешением 1 км) и инфракрасном (7 каналов с разрешением 4 км) диапазонах спектра. Характеристика каналов представлена в табл. 1. Бортовая калибровка регистрируемых сигналов в каналах обеспечивается референсными источниками (лампы, имитаторы абсолютно черного тела). Периодичность съемки составляет 30 мин, что особенно важно для изучения пространственно-временных изменений общего содержания озона и получения его региональных оценок с возможностью построения многолетних трендов ОСО. Инфракрасные каналы обеспечивают получение количественной информации о параметрах атмосферы, облачности и подстилающей поверхности. В канале 8 (9.2–10.2 мкм) регистрируется уходящее излучение в спектральном диапазоне полосы поглощения озона около 9.6 мкм, что позволяет определять общее содержание озона в атмосфере. Измеряемые в “озоновом” канале радиационные температуры чувствительны к вариациям концентрации озона, вертикального распределения температуры, а также к вариациям температуры и излучательной способности подстилающей поверхности (Schmidt, Hoffman, 2010). Поэтому для получения достоверных оценок ОСО по спутниковым измерениям требуется привлечение дополнительных источников информации о вышеуказанных параметрах, которые были получены из модели GFS NCEP.

#### НАБОР ДАННЫХ ДЛЯ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Для обучения искусственной нейронной сети и проверки качества ее работы была сформирована выборка данных, которая разделялась на 3 части: выборка непосредственно для обучения, выборка для валидации при обучении и выборка для проведения тестов. Для наиболее точной оценки работы сети в тестовую выборку не включаются данные, которые участвовали в обучении.

В данной работе рассматривается МСУ-ГС КА Электро-Л № 3, имеющего точку стояния  $76.6^\circ$  долготы, а область интереса находится в пределах от  $-70^\circ$  до  $70^\circ$  по широте и от  $10^\circ$  до  $140^\circ$  по долготе. В качестве входных данных для нейронной сети в выборку были включены данные измерений 7-и инфракрасных каналов данного прибора, так как основные полосы поглощения озона лежат в инфракрасном диапазоне. Дополнительно включались: профиль температуры (31 уровень от 1000 гПа до 1 гПа) и приземное давление, полученные из модели GFS NCEP. Это обуславливается тем, что тепловой режим атмосферы определяет ее потенциальную завихренность, которая в стратосфере сильно коррелирует со озоном. Аналогичный подход к выбору исследуемых параметров был рассмотрен в (Schmidt, Hoffman, 2010). Для учета пространственно-временного изменения полей ОСО в выборку включалась информация о зенитном угле спутника и Солнца. Зенитный угол спутника позволит нейронной сети учесть различия значений в каналах прибора по удаленности от надира, а зенитный угол Солнца – зависимость показателей яркостной температуры в каналах прибора от освещенности подстилающей поверхности.

Разрабатываемая ИНС должна решать задачу вычисления значений ОСО по определенным признакам. Для этого в выборке должна присутствовать априорная информация о количестве озона в столбе атмосферы. Такие данные могут быть получены по наземным или спутниковым измерениям. Наземные станции наблюдения дают наиболее точные измерения общего содержания озона в столбе атмосферы. Минусом таких данных является их неравномерная пространственная распределенность, так как наземные станции производят замеры в конкретных географических точках. Ввиду широтной зависимости пространственного распределения полей ОСО, этот минус не позволяет собрать достаточную по объему и разнообразию выборку для обучения ИНС. Поэтому в качестве эталонных значений ОСО выбирались его спутниковые оценки по данным прибора OMPS KA Suomi NPP. Были использованы данные уровня 2 (OMPS-NPP L2 NM Ozone (O3) Total Column swath orbital), в которых содержание озона вычисляется из значений нормализованной яркости с использованием двух пар длин волн: 317.5 и 331.2 нм для большинства условий и 331.2 и 360 нм для условий с высоким содержанием озона и большим зенитным углом Солнца. Данные были получены из NASA Goddard Earth Sciences (GES) Data and Information Services Center (DISC) (Jaross, 2017). Таким образом, общее количество записей в наборе данных для ИНС составило 225 000 за период с января по апрель 2021 г. Распределение набранных значений ОСО лежит в пределах от 195 до 460 DU. Обучающая выборка составила 70% от общего количества записей, валидационная и тестовая – по 15%.

**Таблица 1.** Характеристика каналов прибора МСУ-ГС космического аппарата Электро-Л № 3

Канал	Спектральный интервал, мкм	Канал	Спектральный интервал, мкм
1	0.5–0.65	6	7.5–8.5
2	0.65–0.8	7	8.2–9.2
3	0.8–0.9	8	9.2–10.2
4	3.5–4.01	9	10.2–11.2
5	5.7–7.0	10	11.2–12.5

Итоговый набор содержит в себе разные по физическому смыслу данные, которые сильно различаются по своим абсолютным величинам. Такой дисбаланс в значениях признаков может вызвать неустойчивость работы модели ИНС, замедлить процесс ее обучения и ухудшить итоговый результат. Поэтому выборка была нормализована отдельно по каждому признаку классическим способом согласно выражению:

$$X_n = \frac{X - \mu}{\sigma},$$

где  $X$  – вектор всех значений признака из выборки,  $\mu$  – среднее значение для вектора  $X$ ,  $\sigma$  – стандартное отклонение значений для вектора  $X$ . Таким образом удастся добиться получения среднего значения каждого признака по всем данным равным нулю, а дисперсии – единице.

### АРХИТЕКТУРА ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И ПРОЦЕСС ОБУЧЕНИЯ

В данной работе для решения регрессионной задачи определения ОСО были рассмотрены варианты архитектур искусственной нейронной сети, построенных по типу полносвязных нейронных сетей (многослойных перцептронов). Такой подход является одним из наиболее распространенных в различных направлениях применения ИНС и демонстрирует одни из лучших показателей точности в решении задач регрессионного анализа. Полносвязные ИНС состоят из входного, выходного, а также одного или нескольких скрытых слоев. Размерность входного слоя для поставленной задачи определяется количеством подаваемых на вход параметров (признаков), определенных ранее, а размерность выходного слоя равна 1, так как определяется только одно значение – ОСО в столбе атмосферы. В данной работе в архитектуры рассматриваемых ИНС также были добавлены слои активации и слои нормализации активации, которые делают обучение нейронной сети более устойчивым (Ioffe, Szegedy, 2015). Для каждой архитектуры эмпирически выбирались число используемых скрытых слоев и их размерность. В качестве функций активации рассматривались ReLU (Rectified Linear Unit), которая реализуется выражением  $f(x) = \max(0, x)$ , и tanh (гиперболический тангенс).

Процесс обучения ИНС – это итерационный пересчет весовых коэффициентов нейронов в слоях по заданному алгоритму оптимизации. Обучение выполнялось с помощью алгоритма обратного распространения ошибки, по которому определяется реакция сети на подаваемые данные от входного слоя к выходному на каждом шаге с фиксированными весами нейронов. На основе полученной реакции, определяется ошибка выходного слоя, которая определяется функцией потерь, далее проводится пересчет весовых коэффициентов каждого нейрона по методу градиентного спуска во время обратного прохода нейронной сети. В качестве функции потерь в данной работе использовалось среднеквадратическое отклонение.

В качестве алгоритма оптимизации был выбран алгоритм Adam (Kingma, Ba, 2015), который объединяет в себе идеи сохранения инерции и масштабирования градиента. Главная идея инерции – использование значений градиента, полученных на предыдущих итерациях обучения, чтобы “смягчить” его быстрое изменение в каждой итерации. Идея масштабирования заключается в том, чтобы шаг обучения выбирался отдельно для каждого параметра на основе данных о градиенте на предыдущих итерациях. Это достигается тем, что каждый элемент градиента делится на квадратный корень суммы квадратов предыдущих значений элемента. Такой подход позволяет достичь более высокой производительности в поиске оптимальных значений параметров по сравнению с другими методами оптимизации.

Обучение ИНС останавливается при достижении минимальных изменений в показателях метрик машинного обучения для валидационной выборки на протяжении нескольких итераций. В качестве метрик были выбраны среднеквадратическое отклонение и средняя абсолютная ошибка.

Точность обученной ИНС оценивалась по данным тестовой выборки. В качестве метрик точности были выбраны: средняя абсолютная ошибка (MAE), среднеквадратическое отклонение (RMSE), среднее смещение (BIAS), коэффициент корреляции Пирсона ( $\rho$ ), коэффициент детерминации ( $R^2$ ).

Во время проведения экспериментов по обучению различных архитектур ИНС и определению наиболее оптимальных размеров скрытых слоев и их количества, проводились эксперименты по определению наиболее весомых признаков для оценки ОСО. Для этого нейронная сеть поочередно обучалась, исключая какой-либо из признаков. Если это исключение не приводило к сильным ухудшениям показателей используемых метрик, считалось, что данный входной параметр имеет малое влияние на результат определения общего содержания озона и его можно не использовать при обучении. Таким образом было определено, что можно исключить измерения 4, 5, 6 и 10 каналов прибора МСУ-ГС. В результате прове-

денных экспериментов была выявлена наилучшая, согласно указанным метрикам, конфигурация архитектуры, которая состоит из пяти полносвязных слоев: входного слоя с размерностью, равной 37; трех скрытых полносвязных слоев с размерностями 64, 128 и 256 нейронов, дополнительно к которым включались слои с активацией ReLU и слои нормализации; и выходного слоя с размерностью, равной 1. Метрики для обученной ИНС по данным тестовой выборки имеют следующие показатели: MAE – 1.9 DU, RMSE – 0.9 DU, BIAS – –0.01 DU,  $\rho$  – 99.8%,  $R^2$  – 99.6%. На рис. 1 представлены примеры карт ОСО для безоблачных пикселей, построенных с помощью разработанного алгоритма и по данным прибора OMPS.

Рассчитанные метрики для тестовой выборки говорят о хорошей корреляции и точности определения ОСО по отношению к спутниковым оценкам, полученным по данным прибора OMPS. Это также подтверждается визуальной корреляцией значений общего содержания озона по рис. 1.

## ВАЛИДАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное тестирование на выборке показывает качество обучения ИНС по собранным данным с OMPS. Для оценки точности работы предлагаемого алгоритма были проведены дополнительные сравнения. Первое – с данными наземных озонметрических станций, которые дают наиболее точные данные о содержании озона в столбе атмосферы. База данных с наземными измерениями была взята у WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre) – один из шести мировых центров являющийся частью программы глобального наблюдения за атмосферой Всемирной Метеорологической Организации (ВМО). Второе – с данными из архивов AERONET (AErosol RObotic NETwork) – программы по объединению наземных сетей зондирования аэрозолей, созданной NASA и LOA-PHOTONS (CNRS), которая значительно дополняется данными национальных агентств, институтов и университетов, отдельными учеными и партнерами. Программа обеспечивает долгосрочную и легкодоступную базу данных об оптических, микрофизических и радиационных свойствах аэрозолей для исследования и определения характеристик аэрозолей и подтверждения их спутниковых оценок. AERONET обеспечивает 3 уровня качества данных, последний из которых (2.0) гарантирует качественные данные по измерениям с фильтрацией облачности. Информация об общем содержании озона в архивах AERONET собирается по данным прибора TOMS, установленном на спутниках Earth Probe и Nimbus.

Для сравнения был выбран период с января по апрель 2021 г. Для рассматриваемых точек разница во времени между измерениями из баз данных и спутниковой съемки не превышала 30 мин, а расстояние не превышало 4 км. Точность рассчи-

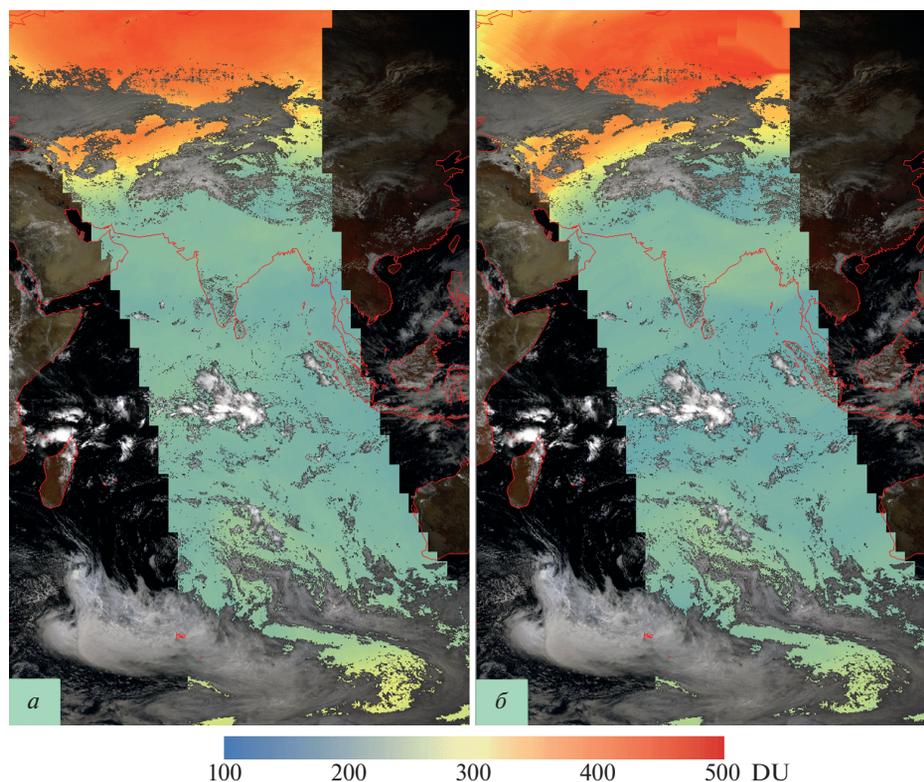


Рис. 1. Примеры карт ОСО по данным МСУ-ГС (а) за 2021.02.22 08:00 и ОМПС (б) за 2021.02.22 07:51.

тивалась по тем же метрикам, которые использовались для тестовой выборки. Для того же временного периода было проведено сравнение значений ОСО, полученных по данным ОМПС, с данными архивов WOUDC и AERONET. Для валидации значений ОСО по данным МСУ-ГС было набрано 8000 точек из архива AERONET и 3500 точек из архивов WOUDC, а для данных ОМПС – 700 и 500 точек соответственно. В таблице 2 представлены показатели метрик для всех рассматриваемых сроков.

По результатам валидации видна хорошая корреляция восстанавливаемых по данным МСУ-ГС значений ОСО с данными архивов WOUDC и AERONET. Схожесть значений метрик по данным МСУ-ГС и ОМПС подтверждает хорошие показатели обучения ИНС. Важно отметить, что показатели точности для архивов AERONET немного лучше, чем для WOUDC для двух спутниковых приборов. Это может объясняться наличием в архивах WOUDC измерений, сделанных в облачности, тогда как AERONET проводит фильтрацию по данному признаку. По требованиям ВМО, ошибка восстановления ОСО не должна превышать 15 DU (World Meteorological Organization (WMO), 2018). Разработанный алгоритм не в полной мере достигает заданных показателей точности, но результаты сопоставимы с аналогичными продуктами, получаемым по данным других геостационарных спутниковых приборов

(Schmidt, Hoffman, 2010; Lee et al., 2019) или лучше (Polyakov, Timofeev, 2008; Крамчанинова, Успенский, 2013; Roshydromet, 2019). Наличие только одного канала для полосы поглощения в районе 9.6 мкм, несовершенство маски облачности не позволяют в полной мере использовать полученные оценки ОСО по данным МСУ-ГС, например, в таких задачах, как изменение климата или анализ УФ радиации. Для этих целей используются специализированные спутниковые приборы, данные наземных измерений или радиозондирования. Разработанная методика восстановления ОСО по данным МСУ-ГС хорошо подойдет для проведения процедур атмосферной коррекции, калибровки и восстановления параметров атмосферы по данным КА Электро-Л № 3.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрен алгоритм восстановления общего содержания озона в столбе атмосферы с помощью полносвязной искусственной нейронной сети по данным прибора МСУ-ГС геостационарного КА Электро-Л № 3. В данном алгоритме нет необходимости дополнительной настройки каких-либо параметров, то есть возможен расчет глобальных карт распределения ОСО в автоматическом режиме в регионе от  $-70^\circ$  до  $70^\circ$  по широте и от  $10^\circ$  до  $140^\circ$  по долготе. Входными данными для используемой ИНС являются 7, 8 и 9 каналы прибора МСУ-ГС, профиль температу-

Таблица 2. Результаты валидации

Прибор/архив	RMSE (DU)	MAE (DU)	BIAS (DU)	$\rho$ , %	$R^2$ , %
МСУ-ГС/AERONET	18.5	13.4	-9.5	89.6	74.6
OMPS/AERONET	17.6	12.4	-7.1	92.8	75.4
МСУ-ГС/WOUDC	19.2	15.7	-7.8	86.9	72.8
OMPS/WOUDC	18.7	12.9	-7.8	91.9	83.2

ры и приземное давление, полученные из модели GFS NCEP, информация о зенитном угле спутника и Солнца. Преимущество предлагаемого метода перед физическим подходом, использующим модели переноса излучения, состоит в меньшей трудоемкости самого алгоритма, что уменьшает время обработки спутниковой информации. При этом точность оценки параметров не сильно уступает физическому подходу. Подход с использованием статистических методов уступает нейросетевым в том, что приходится определять значительное количество предикторов и пороговых значений, что не всегда является возможным для достижения необходимой точности из-за сложности анализируемых процессов.

Результаты проведенной валидации по данным из архивов AERONET и WOUDC показали, что среднеквадратическая ошибка восстановления ОЗО составляет 18.5 DU по отношению к AERONET и 19.2 DU по отношению к WOUDC, а средняя абсолютная ошибка – 13.4 DU и 15.7 DU соответственно. Такие результаты говорят о хорошей точности работы предлагаемого алгоритма, сопоставимой с аналогичными продуктами, получаемым по данным других спутниковых приборов (Schmidt, Hoffman, 2010; Lee et al., 2019) или лучше (Polyakov, Timofeev, 2008; Крамчанинова, Успенский, 2013; Roshydromet, 2019).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Крамчанинова Е.К., Успенский А.Б. Мониторинг общего содержания озона в атмосфере по данным российского геостационарного метeosпутника “Электро-Л”. // Исследование Земли из космоса. 2013. № 2. С. 12–18.
- Hassler B., Petropavlovskikh I., Staehelin J., August T., Bhar-tia P.K., Clerbaux C., Degenstein D., Mazière M.D., Dinelli B.M., Dudhia A., Dufour G., Frith S.M., Froidevaux L., Godin-Beekmann S., Granville J., Harris N.R.P., Hoppel K., Hubert D., Kasai Y., Kurylo M.J., Kyrölä E., Lambert J.-C., Levelt P.F., McElroy C.T., McPeters R.D., Munro R., Nakajima H., Parrish A., Raspollini P., Remsberg E.E., Rosenlof K.H., Rozanov A., Sano T., Sasano Y., Shiotani M., Smit H.G.J., Stiller G., Tamminen J., Tarasick D.W., Urban J., van der A R.J., Veefkind J.P., Vigou-roux C., von Clarmann T., von Savigny C., Walker K.A., Weber M., Wild J., Zawodny J.M. Past changes in the vertical distribution of ozone – Part 1: Measurement techniques, uncertainties and availability // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7. P. 1395–1427. <https://doi.org/10.5194/amt-7-1395-2014>
- Ioffe S., Szegedy C. Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift. // Proceedings of the 32nd International Conference on International Conference on Machine Learning – Volume 37 (ICML'15). Lille, France, 2015. P. 448–456.
- Jaross G. OMPS-NPP L2 NM Ozone (O3) Total Column swath orbital V2. Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2017. <https://doi.org/10.5067/0WV4HAAZ0VHK>
- Jin X., Li J., Schmidt C.C., Schmit T.J., Li J. Retrieval of total column ozone from imagers onboard geostationary satellites. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2008. V. 46. № 2. P. 479–488. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.910222>
- Kingma D.P., Ba J.L. Adam: a method for stochastic optimization. // CoRR. 2015. № abs/1412.6980.
- Lee S.J., Ahn M., Ha S. Total Column Ozone Retrieval From the Infrared Measurements of a Geostationary Imager. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2019. V. 57. № 8. P. 5642–5650. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2901173>
- Li J., Li J., Schmidt C.C., Nelson III J.P., Schmit T.J. High temporal resolution GOES sounder single field of view ozone improvements. // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. № L01804. <https://doi.org/10.1029/2006GL028172>
- McPeters R.D., Bhartia P.K., Krueger A.J., Herman J.R. Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide. NASA Goddard Space Flight Center, 1998. 70 p.
- McPeters R., Frith S., Kramarova N., Ziemke J., Labow G. Trend quality ozone from NPP OMPS: the version 2 processing. // Atmos. Meas. Tech. 2019. V. 12. P. 977–985. <https://doi.org/10.5194/amt-12-977-2019>
- Polyakov A.V., Timofeev Y.M. Determining the total ozone from geostationary earth satellites. // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2008. V. 44. P. 745–752. <https://doi.org/10.1134/S000143380806008X>
- Roshydromet. Meteorological satellite data and products applications in Roshydromet. CGMS-47 ROSHYDROMET-WP-03, 2019. 11 p [URL: <https://www.cgms-info.org/Agendas/GetWp-File.ashx?wid=9d79a9f5-17aa-4dc9-9789-58b38a4-ba804&aid=a63dcf2e-bcc9-469f-a07b-8824959b599b>].
- Schmidt C.C., Hoffman J.P. ABI Ozone Detection. Algorithm Theoretical Basis Document. NOAA/NESDIS/STAR. Ver. 2.0. 2010. 43 p.
- Timofeyev Y.M., Uspensky A.B., Zavelevich F.S., Polyakov A.V., Viro-lainen Y.A., Rublev A.N., Kukharsky A.V., Kiseleva J.V., Kozlov D.A., Kozlov I.A., Nikulin A.G., Pyatkin V.P., Rusin E.V. Hyperspectral infrared atmospheric sounder IKFS-2 on “Meteor-M” No. 2 – Four years in orbit. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2019. V. 238. № 106579. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.106579>
- Turquety S., Hadji-Lazarou J., Clerbaux C., Hauglustaine D.A., Clough S.A., Cassé V., Schlüssel P., Mégie G. Operational trace gas retrieval algorithm for the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. № D21301. <https://doi.org/10.1029/2004JD004821>
- Veefkind J.P., de Haan J.F., Brinksma E.J., Kroon M., Levelt P.F. Total ozone from the ozone monitoring instrument (OMI) using the DOAS technique // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2006. V. 44. № 5. P. 1239–1244. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.871204>
- World Meteorological Organization (WMO). Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume IV: Space-based Observations. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2018. 265 p.

## Determination of the Total Ozone Content in Atmospheric Column according to the Data of Electro-L No. 3 Spacecraft Using Neural Networks Satellite

V. D. Bloshchinskiy<sup>1</sup>, M. O. Kuchma<sup>1</sup>, and A. V. Kukharsky<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>State Research Center for Space Hydrometeorology “Planeta”, Moscow, Russia

The paper considers a method for retrieval of the total ozone content in atmospheric column on basis of artificial neural networks according to the MSU-GS instrument of the Electro-L No. 3 geostationary spacecraft. The tests and comparisons of the retrieved values of total ozone content according to the MSU-GS data with the ground-based measurements from the AERONET and WOUDC archives, as well as with satellite estimates based on the OMPS instrument data, showed a high correlation and accuracy. The mean absolute error when compared with OMPS was 1.9 DU, with AERONET – 13.4, with WOUDC – 15.7, and the correlation was 99.8, 89.6 and 86.9%, respectively. The obtained results indicate good accuracy and efficiency of the proposed method for retrieval of total ozone content.

**Keywords:** remote sensing, MSU-GS, Electro-L, gas, ozone, artificial neural network

### REFERENCES

- Kramchaninova E.K., Uspensky A.B. Monitoring obshchego soderzhaniya ozona v atmosfere po dannym rossijskogo geostacionarnogo meteosputnika “Elektro-L”. [Monitoring of the total ozone content in the atmosphere according to the Russian geostationary meteorological satellite “Elektro-L.”] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2013. № 2. P. 12–18.
- Hassler B., Petropavlovskikh I., Staehelin J., August T., Bhartia P.K., Clerbaux C., Degenstein D., Mazjère M.D., Dinelli B.M., Dudhia A., Dufour G., Frith S.M., Froidevaux L., Godin-Beekmann S., Granville J., Harris N.R.P., Hoppel K., Hubert D., Kasai Y., Kurylo M.J., Kyrölä E., Lambert J.-C., Levelt P.F., McElroy C.T., McPeters R.D., Munro R., Nakajima H., Parrish A., Raspollini P., Remsberg E.E., Rosenlof K.H., Rozanov A., Sano T., Sasano Y., Shiotani M., Smit H.G.J., Stiller G., Tamminen J., Tarasick D.W., Urban J., van der A R.J., Veefkind, J. P., Vigouroux C., von Clarmann T., von Savigny C., Walker K.A., Weber M., Wild J., Zawodny J.M. Past changes in the vertical distribution of ozone – Part 1: Measurement techniques, uncertainties and availability // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7. P. 1395–1427. <https://doi.org/10.5194/amt-7-1395-2014>
- Ioffe S., Szegedy C. Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift. // *Proceedings of the 32nd International Conference on International Conference on Machine Learning – Volume 37 (ICML'15)*. Lille, France, 2015. P. 448–456.
- Jaross G. OMPS-NPP L2 NM Ozone (O3) Total Column swath orbital V2. Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2017. <https://doi.org/10.5067/0WF4HAAZ0VHK>
- Jin X., Li J., Schmidt C.C., Schmit T.J., Li J. Retrieval of total column ozone from imagers onboard geostationary satellites. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2008. V. 46. № 2. P. 479–488. doi 10.1109/TGRS.2007.910222
- Kingma D.P., Ba J.L. Adam: a method for stochastic optimization // *CoRR*. 2015. No. abs/1412.6980.
- Lee S.J., Ahn M., Ha S. Total Column Ozone Retrieval From the Infrared Measurements of a Geostationary Imager. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2019. V. 57. № 8. P. 5642–5650. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2901173>
- Li J., Li J., Schmidt C.C., Nelson III J.P., Schmit T.J. High temporal resolution GOES sounder single field of view ozone improvements // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. № L01804. <https://doi.org/10.1029/2006GL028172>
- McPeters R.D., Bhartia P.K., Krueger A.J., Herman J.R. Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User’s Guide. NASA Goddard Space Flight Center, 1998. 70 p.
- McPeters R., Frith S., Kramarova N., Ziemke J., Labow G. Trend quality ozone from NPP OMPS: the version 2 processing // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V. 12. P. 977–985. <https://doi.org/10.5194/amt-12-977-2019>
- Polyakov A.V., Timofeev Y.M. Determining the total ozone from geostationary earth satellites. // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2008. V. 44. P. 745–752. <https://doi.org/10.1134/S000143380806008X>
- Roshydromet. Meteorological satellite data and products applications in Roshydromet. CGMS-47 ROSHYDROMET-WP-03, 2019. 11 p [URL: <https://www.cgms-info.org/Agendas/GetWp-File.ashx?wid=9d79a9f5-17aa-4dc9-9789-58b38a4-ba804&aid=a63dcf2e-bcc9-469f-a07b-8824959b599b>].
- Schmidt C.C., Hoffman J.P. ABI Ozone Detection. Algorithm Theoretical Basis Document. NOAA/NESDIS/ STAR. Ver. 2.0. 2010. 43 p.
- Timofeyev Y.M., Uspensky A.B., Zavelevich F.S., Polyakov A.V., Viro-lainen Y.A., Rublev A.N., Kukharsky A.V., Kiseleva J.V., Kozlov D.A., Kozlov I.A., Nikulin A.G., Pyatkin V.P., Rusin E.V. Hyperspectral infrared atmospheric sounder IKFS-2 on “Meteor-M” No. 2 – Four years in orbit. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2019. V. 238. № 106579. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.106579>
- Turquety S., Hadji-Lazaro J., Clerbaux C., Hauglustaine D.A., Clough S.A., Cassé V., Schlüssel P., Mégie G. Operational trace gas retrieval algorithm for the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. № D21301. <https://doi.org/10.1029/2004JD004821>
- Veefkind J.P., de Haan J.F., Brinksma E.J., Kroon M., Levelt P.F. Total ozone from the ozone monitoring instrument (OMI) using the DOAS technique // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2006. V. 44. № 5. P. 1239–1244. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.871204>
- World Meteorological Organization (WMO). Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume IV: Space-based Observations. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2018. 265 p.

---

---

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

---

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ  
ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА ОРОШАЕМЫХ УГОДИЙ**

© 2022 г. Е. В. Денисова\*

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук”, Волгоград, Россия**\*E-mail: denisov.00@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

Отсутствие актуальной картографической основы приводит к бесконтрольному обороту земель, не отражает их реальное состояние и использование, тем самым вызывая разрушение и деградацию не только отдельных компонентов агроландшафта, но и целых природных систем. Агроландшафт является сложной экологической системой, которая в жестких условиях потребления, теряет свою способность к самовосстановлению и регуляции на очень длительное время. И каждый из его компонентов нуждается в учете, наблюдении и защите. Орошаемые угодья представляют собой особую составляющую в этой системе, от состояния которой зависит получение сельскохозяйственной продукции независимо от количества осадков. Целью работы является проведение дистанционного мониторинга орошаемых и богарных земель с применением ГИС-технологий для их структуризации и создания локальной геоинформационной системы учета орошаемых площадей. Данные, полученные с использованием геоинформационных технологий, позволили выявить расхождение в площади Новонадеждинского муниципального образования Городищенского района Волгоградской области на 200 га или 3.3%, площадь сельскохозяйственных угодий выросла на 157.8 га или 3.8% (по сравнению с данными 2010 г.). С помощью дистанционных методов была проведена оценка 159 контуров пахотных угодий на площади 4134.6 га, с определением их конфигурации, размера (от 0.37 га до 129.2 га), средней крутизны склона – 0.92°, перепадом высот по всей территории исследования – 53 м. Более 18% территории имеет крутизну склона свыше 3°, что в условиях применения орошения может спровоцировать усиление деградационных процессов. Проведенные полевые исследования в границах 19 земельных участков дали возможность уточнить характер и режим использования каждого участка – орошаемый или богарный, определить вид посевов, разрешенное использование, а также наличие защитных лесных полос, как одного из компонентов агроландшафта. Недоступность информации об учете орошаемых земель, их распределения, динамики состояния является насущной проблемой не только данного региона. Методики проведения подобных исследований сельскохозяйственных угодий являются особенно актуальными для ведения учета земельных ресурсов, их правового использования, формирования налогооблагаемой базы любого региона. Новизна исследования заключается в создании локальной геоинформационной системы учета орошаемых земель, структуризации информации о их пространственном распределении, использовании и формировании механизма социально-экономического и экологического регулирования управления земельными ресурсами на примере отдельного региона.

*Ключевые слова:* агроландшафт, ГИС-технологии, мониторинг, орошаемые земли, пахотные угодья, система, учет

DOI: 10.31857/S0205961422030046

**ВВЕДЕНИЕ**

Текущий характер использования земель сельскохозяйственного назначения говорит об увеличении антропогенной нагрузки и, как следствие, изменении естественных природных комплексов и ландшафтов в целом. Особого внимания требуют пахотные орошаемые земли с различными видами орошения (дождевание, капельное и т.п.), так как испытывают наибольшую антропогенную нагрузку, ввиду различного воздействия. Для снижения этой нагрузки необходимо научно-методическое обеспечение, основанное на современных исследованиях, как отдельных компо-

нентов, так и всего агроландшафта (Глотов, 2013; Смирнова и др., 2011).

Землеустройство как система конкретных мероприятий по грамотному использованию земель, с учетом их охраны обязано включать в себя знания об экологии ландшафтов. В виду нарастающей угрозы разрушения земель, развитию эрозийных процессов необходимо учитывать исторически сложившиеся законы природы и выстраивать сельскохозяйственное производство на эколого-ландшафтной основе, что даст лучший результат в производительности сельскохозяйственных угодий, в т.ч. орошаемых, снизит риск

дальнейшего ухудшения эродированных земель, повысит урожайность возделываемых культур.

Землеустройство предполагает собой различные подходы в земледелии, способах обработки почв, которые должны соответствовать имеющимся условиям конкретного региона и природных зон (Докучаев, 1936; Ханбабаев и др., 2015).

Существующая методика учета и устройства орошаемых земельных участков не учитывает особенности и свойства ландшафта, отраслевую и зональную приспособленность территории, не отвечает вопросам защиты земель и воспроизводству ее полезных качеств. Сложившаяся система использования орошаемых земель базируется на исследованиях, входящих в состав проектов внутрихозяйственного землеустройства, проводимых в 70–80-х годах прошлого столетия (Денисова, 2019).

Для мониторинга земельных ресурсов огромное значение имеют дистанционные методы исследований. В землеустройстве достаточно популярным является картографический мониторинг, который предназначен для слежения за процессами деградации и выбытия сельскохозяйственных угодий, а также их мелиорации (Папаскири, 2013, 2014).

Информация, получаемая с помощью космической цифровой съемки, является территориально всеобъемлющей, современной, актуальной, востребованной и необходимой для обеспечения эффективного использования и учета земельных ресурсов.

Задачами исследования являются: проведение дистанционного мониторинга пахотных земель в границах Новопазаришского сельского поселения Городищенского района, обобщение результатов полевых и камеральных исследований для установления фактического использования орошаемых площадей, границ и пространственного расположения данных угодий, формирование локальной геоинформационной системы учета орошаемых земель с разработкой картографического обеспечения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Космические снимки обеспечивают достоверность и объективность полученной информации о состоянии и использовании земель всех категорий, их местоположения, площадях и позволяют сформировать комплексный системный подход к оценке земель, степени их вовлеченности в производственные процессы, а также уровень их деградации и сохранности (Мельникова, 2010; Папаскири, 2020).

Современные преобразования в сельском хозяйстве, переход право собственности от государственного к частому, привели к тому, что прежняя модель использования земельных угодий в границах крупных сельскохозяйственных предприятий (колхозов и совхозов) перестала существовать. Появились новые собственники, владельцы и поль-

зователи земельных участков, которые пожелали закрепить свое право собственности на местности, т. е. выделить земельные участки, с определением их координат и площади.

Методология геоинформационного мониторинга базируется на точном позиционировании и размещении объектов исследуемой территории с использованием пространственных данных, специализированных геодезических, спутниковых систем, выполняющих съемку с определенной точностью. Точность геопозиционирования космоснимков определяется характеристиками съемочной аппаратуры спутников и составляет 0.5 разрешения изображения. Разрешение космоснимка для исследования пашни выбирается от 1 до 15 м.

Для геоинформационного анализа и реализации обработки пространственных данных используется программный комплекс QGIS 3.12, распространяемый свободно. Космоснимки в настоящее время являются основным источником объективной информации (Lidin, 2018; Rawat, Kumarh, 2015; Roy, 2014) об объектах изучения. Наиболее доступными для большинства исследователей являются космоснимки со спутников “Sentinel 2”, “Landsat-8” или “Landsat-7”, размещенные на ГИС - сервисах для свободного использования и позволяющие проводить весь комплекс исследований, связанных с получением информации о состоянии сельскохозяйственных угодий (Erol, 2005). Для получения данных о высотах рельефа SRTM 3 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus>, 2021; <https://srtm.csi.cgiar.org>, 2021).

Определение пространственных изменений в орошаемой пашне проводится по разновременным безоблачным спутниковым снимкам Landsat в программных пакетах ENVI и QGIS. На начальном этапе формируется векторная маска контура объекта исследования. На ее основе формируются фрагменты изображения на территорию исследования за различные годы. Затем проводится тематическое картографирование изображения с использованием алгоритмов контролируемых или неконтролируемых классификаций в программном пакете ENVI с целью выделения доминирующих классов наземного покрова (например, “насаждения”, “сельскохозяйственные земли”, “сооружения”, “водные объекты” и т.д.) (Виноградов, 1984). Полученные тематические растровые слои проходят пост-классификационную обработку и преобразуются в полигональные векторные слои. Вся последующая работа по пространственному анализу и оценке изменений наземного покрова на территории исследования проводится в среде QGIS. Дешифрирование пахотных угодий, в т. ч. орошаемых, проводится по космоснимкам, они имеют достаточную площадь, разделены на поля технологическими проездами, полевыми дорогами или лесными насаждениями, могут быть покрыты растительностью.

Для обработки данных космической съемки используется определенный набор программных продуктов, а именно программы создания геоинформационных систем QGIS, программы анализа полученных данных Surfer, Excel, Statistica и др., при помощи которых создаются картографические модели, таблицы статистических данных и математическое описание выявленных закономерностей. Геоинформационные технологии используются для создания пространственной базы данных об орошаемых землях (координат, геометрии, местоположении, площадях, экспозиции, уклоне и др.), что представляет собой инновационный подход к формированию локальной системы учета орошаемых земель, создания современного картографического обеспечения для эффективного управления и функционирования как всего агроландшафта, так и отдельных его компонентов.

Получение космических снимков с привязкой к координатам дает возможность исследовать пространственное размещение контуров участков всех исследуемых земель, в т.ч. орошаемых. При этом использование снимков сверхвысокого разрешения, дополнительной графической и атрибутивной пространственной информации позволяет с высокой точностью определить их пространственное размещение и провести анализ распределения таких участков на территории исследований, на основании чего создаются соответствующие тематические карты. Карты разрабатываются на основе цифровой топографической модели по космоснимкам, соответствующим объектам исследований, в среде ГИС в виде тематических растровых, векторных и атрибутивных слоев (Amin, Fazal, 2012).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Орошаемые угодья являются высокоинтенсивным компонентом агроландшафта и в значительной степени оказывают влияние на формирование экологической стабильности и равновесия во всем агроландшафте. Интенсивная эксплуатация орошаемых земель способна спровоцировать негативные явления, а именно засоление, снижение почвенного плодородия, разрушение гумусового слоя, вывод сельскохозяйственных угодий из оборота и др., что непосредственно скажется на продуктивности и целостности остальных компонентов агроландшафта.

Вопросами применения дистанционных методов исследований в целях мониторинга определения площадей земель, в том числе орошаемых, их состояния, использования, а также их роли в землеустройстве занимались Андронников В.Л., Волков С.Н., Папаскири Т.В. О значимости, целостности, сохранении и экологической устойчивости агроландшафта говорили И.П. Кружилин, В.Н. Щедрин, И.И. Шопен, Б.А. Шумаков и многие другие (Денисова, 2021).

Распределение орошаемых земель по муниципальным районам Волгоградской области зависит от природно-хозяйственного, земельно-оценочного и почвенного зонирования, учитывающих территориальные особенности природопользования в широком диапазоне: от зон со статусом ООПТ (природные парки, заказники) и территорий традиционного природопользования до промышленных и транспортных производственных комплексов с антропогенной средой (Рябинина, 2011).

Городищенский район Волгоградской области является представителем сухостепной зоны светло-каштановых почв, входит в третий земельно-оценочный район с содержанием гумуса 2–3% и баллом бонитета – 50. Характерной особенностью этих почв является неоднородность почвенного покрова, создаваемая солонцами, солончаками и др.

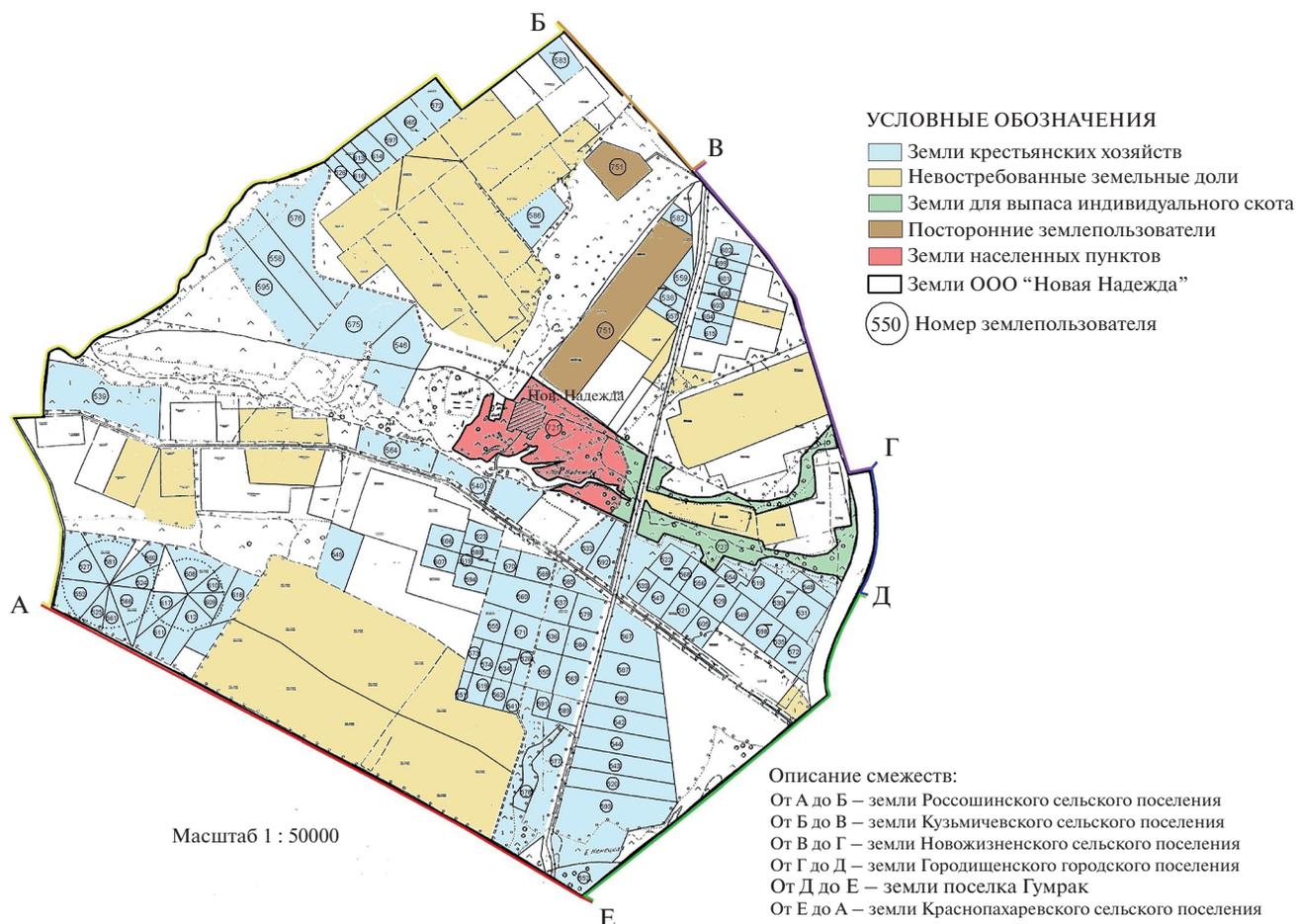
По результатам сельскохозяйственной переписи 2016 г. общая площадь земель Городищенского района составляет 111.06 тыс. га, из которых сельскохозяйственные угодья занимают площадь 106.64 тыс. га, в т.ч. пашни – 70.6 тыс. га, сенокосов – 5.29 тыс. га, пастбищ – 12.04 тыс. га, многолетние насаждения – 2.59 тыс. га, площадь залежей составляет 16.12 тыс. га. Из общей площади сельскохозяйственных угодий фактически использовались 88.91 тыс. га (80%).

Орошаемые сельскохозяйственные угодья исследуемого района занимают 22.74 тыс. га или 25.6% от используемых на самом деле, из них с фактически действующей оросительной системой – 19.06 тыс. га.

Предметом дистанционного исследования стали сельскохозяйственные угодья, а именно пашня, в границах Новонадеждинского сельского поселения Городищенского района Волгоградской области. Такой метод позволил дифференцировать данные угодья на орошаемые и богарные, уточнить используемые площади и назначение, местоположение, а проведенные полевые исследования предоставили действительную информацию по их применению, способам орошения и видам возделываемых культур. Также полевые изыскания данной территории дали возможность оценить весь агроландшафтный комплекс – источники орошения, оросительная сеть, лесные полосы, дорожную сеть, а также земельные угодья.

Это особенно необходимо для эффективного функционирования всей системы, выполнения производственно-хозяйственных целей, т.к. оптимальное сочетание всех элементов агроландшафта, пропорциональности и учета их особенностей, оказывает влияние на экологическое состояние всей системы в целом (Лопырев и др., 2015; Постолов и др., 2019).

Пахотные угодья Новонадеждинского сельского поселения были рассмотрены автором в 2009–2012 гг. Общая площадь поселения составляет 6007 га, в том числе сельскохозяйственных



**Рис. 1.** Схема использования земель в границах Новонадеждинского сельского поселения (на 01 января 2010 г.).

угодий – 5411.6 га, которые относятся к зоне светло-каштановых почв, балл бонитета равен 47. Из общей площади сельскохозяйственных угодий пашня занимает – 3963.4 га, на орошении находится 2092.0 га, на богаре – 1871.4 га (данные на 01 января 2010 г.).

На тот момент, на территории поселения осуществляли свою деятельность сельскохозяйственные предприятия различных форм собственности, а также крестьянские (фермерские) хозяйства (рис. 1).

Современное картографирование данной территории дало возможность получить реальное представление о наличии и использовании пахотных угодий (богарных и орошаемых), их местоположении, определить структуру агроландшафта.

Область исследования расположена на территории с координатами 48°50'08" с.ш. и 44°17'29" в.д. Муниципальное образование обладает следующими характеристиками:

- площадь 5807 га;
- периметр 30.66 км;
- перепад высот 74 м;
- средняя крутизна склона 1.1°;

– максимальная крутизна склона 13.5°;

– пахотные угодья занимают 4115.2 га.

Исследования, проводимые на территории Новонадеждинского сельского поселения, включали два этапа – дистанционный мониторинг 159 пахотных участков и полевые изыскания в границах 19 участков орошаемой и богарной пашни. В состав полевых работ входило уточнение на местности границ, площади участка, вида выращиваемых культур, характера использования – орошаемый или богарный, а также наличие и оценка состояния лесных полос и всего агроландшафта в целом. Все обследованные участки прошли кадастровый учет, отражены на публичной кадастровой карте, с занесением сведений в единый государственный реестр недвижимости (далее ЕГРН), с присвоением кадастрового номера и установленной кадастровой стоимости (табл. 1).

Из 19 земельных участков 13 являются орошаемыми, присутствуют посевы – морковь, картофель, Сельскохозяйственное производство на земельных участках 34:03:160002:120 и 34:03:160002:121 не ведется, по факту является гарью в результате степных

пожаров. Дальнейшее использование данных участков для ведения сельскохозяйственного производства возможно только после проведения комплекса восстановительных работ. Земельный участок 34:03:160002:690 представляет собой естественное пастбище, изрезанное балками, перепады высот от 7 до 10 м. Лесные полосы отсутствуют.

Многоконтурный земельный участок 34:03:160002:784 состоит из трех контуров, предназначен для ведения крестьянского (фермерского) хозяйства. Фактическое состояние каждого из контуров следующее: 34:03:160002:784/1 – дорога; 34:03:160002:784/3 – участок вокруг пруда, поросший камышом, порядок использования участка 34:03:160002:784/2 не установлено, лесные полосы – отсутствуют.

В составе многоконтурного земельного участка 34:03:160002:785 два контура. На контуре 34:03:160002:785/1 выращивается лук с применением капельного орошения. Контур 34:03:160002:785/2 является залежью, на которой расположена сельскохозяйственная техника. Лесные полосы на данных участках отсутствуют.

На 11 обследованных участках, максимальная крутизна склона превышает  $2^\circ$ . Перепад высот более 3 м. Вдоль участка ЗУ 294 присутствует лесная полоса, протяженностью 50 м.

Дистанционный мониторинг осуществлялся на всей территории муниципального образования, и позволил выявить 159 контуров пахотных участков, общей площадью 4134,6 га. Это участки пашни различной конфигурации, размер которых варьируется от 0,37 до 129,2 га. Средняя площадь по всему массиву составляет 26,0 га, средняя крутизна –  $0,92^\circ$ , перепад высот по всей территории исследования – 53 м. Более 18% территории (или 29 земельных участков) имеют крутизну склона свыше  $3^\circ$ , один участок –  $7^\circ$  (П53) (рис. 2, табл. 2).

Объектом геоинформационного моделирования выступает природная антропогенная геосистема богарной и орошаемой пашни с указанием местоположения и набором определенных свойств (характеристик, атрибутов). Компоненты агроландшафта определяются признаками, соответствующим графической информации. Цифровая модель агроландшафта, состоит из следующих разделов: топологическая, геометрическая и атрибутивная. Применение геоинформационной оценки при анализе агроландшафтов основывается на дешифрировании с оцифровкой растровых изображений. Оцифрованные картографической основы с привязанными координатами отражает топографическую основу.

Полевое эталонирование проводилось на ключевых участках, на которых изучались составляющие агроландшафтов и устанавливались связи между ними. По выявленным соответствиям изображенных элементов ландшафтов на космоснимках и в натуре, были установлены дешифровочные признаки почв, растительности, рельефа

и т.д. и на их основе разработаны обзорные и крупномасштабные схемы с определением их достоверности и репрезентативности. На ключевых участках проводилось изучение состава экосистем и связи между элементами.

При геоинформационном картографировании использование цифровой модели рельефа обеспечивает определение характеристик рельефа, в том числе расчет и построение картографических слоев пространственного распределения углов наклона склона, уклонов, экспозиций и др.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение состояния агроландшафта и его отдельных компонентов – пашни, лесных полос и др. с использованием дистанционного мониторинга позволяет получить актуальную информацию о наличии, пространственном размещении пахотных участков, рельефе и др. характеристиках, что, в свою очередь, делает возможным разработать научно-методическое и картографическое обеспечение любой территории с максимальной точностью и в короткие сроки. Исследование орошаемых земель, как отдельной, особо важной категории, необходимо для ведения их учета, целевого использования, влияния на весь агроландшафт в целом, что позволит сформировать устойчивое сельскохозяйственное производство и планирование в сфере управления земельными ресурсами.

Выделение земельных участков из земель бывших сельскохозяйственных предприятий, их использование без осуществления проектного землепользования, отсутствие почвозащитной мероприятий в системах земледелия – все это требует непрерывного мониторинга за сельскохозяйственными угодьями, а особенно орошаемыми землями.

Министерством сельского хозяйства РФ опубликованы данные о состоянии мелиоративного комплекса за 2020 год. Основными сдерживающими факторами повышения продуктивности земель сельскохозяйственного назначения называются:

- недостаточное развитие комплексных мелиораций;
- невысокий технический уровень мелиоративных систем;
- развитие различных процессов деградации.

Однако, что можно считать мелиоративным комплексом? Гидротехнические сооружения (трубопровод, оросительный канал, водозаборные сооружения) или водные объекты и земельные ресурсы? Как проводится учет орошаемых земель? Орошаемыми землями считаются те земли, на которые заключен договор на подачу воды между водопотребителем и учреждением, подведомственному Департаменту мелиорации. Фактически, орошению подлежат участки, соб-

Таблица 1. Параметры исследуемых участков пашни

№ точки	Кадастровый номер	Координаты точек		Орошаемый/ Богарный	Площадь, га учтенная фактич.	Вид посевов
		с.ш.	в.д.			
1	2	3	4	5	6	7
1 2 3 4	34:03:160002:127	48°51'25.98" 48°51'34.65" 48°51'25.04" 48°51'16.46"	44°16'57.33" 44°17'14.76" 44°17'26.06" 44°17'08.06"	Орошаемый	$\frac{16.71}{16.33}$	Картофель
1 2 3 4	34:03:160002:128	48°51'33.89" 48°51'37.57" 48°51'25.58" 48°51'23.50"	44°16'39.13" 44°16'43.02" 44°16'56.87" 44°16'52.50"	Орошаемый	$\frac{5.8}{6.0}$	Картофель
1 2 3 4	34:03:160002:129	48°51'58.44" 48°51'01.32" 48°51'50.56" 48°51'47.36"	44°17'27.74" 44°17'30.57" 44°17'43.86" 44°17'38.34"	Орошаемый	$\frac{6.6}{6.54}$	Морковь
1 2 3 4	34:03:160002:140	48°51'56.21" 48°52'00.79" 48°51'48.21" 48°51'43.74"	44°16'40.67" 44°16'49.75" 44°17'03.84" 44°16'54.61"	Орошаемый	$\frac{10.98}{11.0}$	Посевы отсутствуют
1 2 3 4	34:03:160002:339	48°52'10.70" 48°52'14.43" 48°52'02.28" 48°51'59.19"	44°17'09.59" 44°17'16.23" 44°17'31.13" 44°17'24.17"	Орошаемый	$\frac{8.58}{9.2}$	Морковь
1 2 3 4	34:03:160002:162	48°51'25.12" 48°51'33.72" 48°51'27.39" 48°51'18.95"	44°17'27.13" 44°17'49.99" 44°17'52.55" 44°17'34.61"	Орошаемый	$\frac{11.14}{11.026}$	Морковь
1 2 3 4	34:03:160002:169	48°51'31.61" 48°51'40.13" 48°51'33.73" 48°51'25.13"	44°17'19.86" 44°17'37.43" 44°17'44.99" 44°17'27.11"	Орошаемый	$\frac{11.14}{11.172}$	Морковь
1 2 3 4	34:03:160002:172	48°51'25.44" 48°51'34.45" 48°51'28.71" 48°51'19.74"	44°17'55.38" 44°18'13.18" 44°18'19.53" 44°18'02.42"	Орошаемый	$\frac{10.07}{10.065}$	Морковь
1 2 3 4	34:03:160002:179	48°51'32.09" 48°51'40.60" 48°51'34.46" 48°51'25.45"	44°17'47.53" 44°18'06.02" 44°18'13.18" 44°17'55.38"	Орошаемый	$\frac{11.14}{11.415}$	Морковь
1 2 3 4	34:03:160002:182	48°51'35.21" 48°51'43.71" 48°51'40.68" 48°51'31.12"	44°17'43.74" 44°18'02.24" 44°18'06.04" 44°17'47.48"	Орошаемый	$\frac{5.57}{5.57}$	Морковь

Таблица 1. Продолжение

№ точки	Кадастровый номер	Координаты точек		Орошаемый/ Богарный	Площадь, га учтенная фактич.	Вид посевов
		с.ш.	в.д.			
1	2	3	4	5	6	7
1	34:03:160002:198	48°51'16.03"	44°18'06.63"	Орошаемый	<u>4.5</u> 4.54	Морковь
2		48°51'25.66"	44°18'25.30"			
3		48°51'23.33"	44°18'28.07"			
4		48°51'13.46"	44°18'09.31"			
1	34:03:160002:294	48°51'13.46"	44°18'09.31"	Орошаемый	<u>5.8</u> 5.37	Морковь
2		48°51'21.15"	44°18'23.91"			
3		48°51'18.01"	44°18'27.79"			
4		48°51'09.76"	44°18'14.01"			
1	34:03:160002:424	48°51'19.75"	44°18'02.45"	Орошаемый	<u>6.41</u> 6.41	Морковь
2		48°51'28.70"	44°18'19.53"			
3		48°51'24.93"	44°18'23.82"			
4		48°51'16.04"	44°18'06.63"			
1	34:03:160002:120	48°49'46.50"	44°19'51.11"	Богарный	<u>26.6</u> 26.67	Без посевов (гарь)
2		48°49'42.09"	44°20'30.71"			
3		48°49'32.16"	44°20'34.50"			
4		48°49'38.98"	44°19'48.73"			
1	34:03:160002:121	48°49'41.70"	44°20'31.01"	Богарный	<u>5.8</u> 5.59	Без посевов (гарь)
2		48°49'42.75"	44°20'38.16"			
3		48°49'31.20"	44°20'42.86"			
4		48°49'30.07"	44°20'35.72"			
1	34:03:160002:690	48°49'32.96"	44°19'24.80"	Богарный	<u>72.13</u> 71.29	Без посевов пастбища
2		48°49'29.39"	44°19'36.02"			
3		48°49'34.04"	44°19'39.28"			
4		48°49'20.68"	44°20'28.89"			
5		48°49'23.79"	44°20'33.60"			
6		48°49'15.21"	44°21'16.87"			
7		48°49'27.12"	44°21'25.38"			
8		48°49'36.42"	44°21'26.82"			
9		48°49'49.17"	44°21'22.84"			
10		48°49'46.43"	44°19'28.24"			
11		48°49'38.80"	44°19'48.52"			
12		48°49'46.19"	44°19'51.05"			
13		48°49'41.67"	44°20'31.01"			
14		48°49'42.26"	44°20'37.95"			
1	34:03:160002:784 (1)	48°51'54.75"	44°19'36.12"	Богарный	<u>1.00</u> 1.13	Без посевов (грунтовая дорога)
2		48°51'51.25"	44°19'48.16"			
3		48°51'47.31"	44°19'54.70"			
4		48°51'46.23"	44°19'54.15"			

Таблица 1. Окончание

№ точки	Кадастровый номер	Координаты точек		Орошаемый/ Богарный	Площадь, га учтенная фактич.	Вид посевов
		с.ш.	в.д.			
1	2	3	4	5	6	7
1	34:03:160002:784(2)	48°50'25.63"	44°19'40.01"	Не установлен	$\frac{2.75}{2.79}$	Не установлен
2		48°50'32.22"	44°19'42.18"			
3		48°50'29.36"	44°19'58.23"			
1	34:03:160002:784 (3)	48°50'36.15"	44°18'25.48"	Богарный	$\frac{2.84}{3.0}$	Заросли камыша
2		48°50'44.57"	44°18'39.56"			
3		48°50'38.32"	44°18'16.15"			
1	34:03:160002:785 (1)	48°51'34.94"	44°20'10.95"	Орошаемый	$\frac{3.6}{3.68}$	Лук
2		48°51'31.53"	44°20'16.33"			
3		48°51'22.16"	44°20'13.56"			
4		48°51'22.71"	44°20'09.09"			
1	34:03:160002:785 (2)	48°51'54.46"	44°19'36.40"	Богарный	$\frac{1.0}{1.0}$	Без посевов (залежь)
2		48°51'52.53"	44°19'40.07"			
3		48°51'50.20"	44°19'36.89"			
4		48°51'53.15"	44°19'32.94"			
1	34:03:160003:59	48°48'48.02"	44°15'20.94"	Не установлен	$\frac{29.1}{28.8}$	Не установлен
2		48°49'18.96"	44°15'55.43"			
3		48°49'22.71"	44°15'41.85"			
4		48°48'51.78"	44°15'07.36"			

Таблица 2. Характеристика пахотных участков в границах Новонадеждинского сельского поселения

Диапазон	Площадь участков, га	Количество участков, шт	Средняя площадь участков в диапазоне, га	Средняя крутизна, град
0–10	227.85	39	5.8	0.92
10–20	566.9	40	14.1	0.9
20–50	1902.1	59	32.2	0.92
50–70	706.3	12	58.8	0.93
70–100	602.1	80	75.3	0.9
Более 100	129.2	1	129.2	0.82
Итого	4134.6			

ственники которых сами принимают решение поливать их или нет.

Исследование орошаемых пахотных угодий, как главного компонента агроландшафта направлено на уточнение основных характеристик, учитываемых при орошении – плодородие, уклон пашни, площадь, глубина залегания грунтовых вод и др. Кроме того, агроландшафтные орошаемые комплексы были созданы десятки лет назад и перестали существовать в связи с установлением новых границ землевладельцев и землепользователей.

Использование ГИС для анализа агроландшафтов дает возможность оценить взаимосвязи, объектов их взаиморасположение и взаимодей-

ствие, понять ситуацию в регионе, сделать правильный выбор или лучше подготовиться к принятию решений. Применение дистанционных данных позволяет с высокой долей вероятности получить необходимые характеристики природных и антропогенных объектов.

Отсутствие достоверной и актуальной картографической информации приводит к тому, что нарушается целостность агроландшафта, порядок использования земельных угодий в соответствии с целевым назначением, усиливаются процессы деградации, снижается эффективность в сфере оборота и управления земельными ресурсами. Наглядным примером является территория Новонадеждинского сельского поселения,

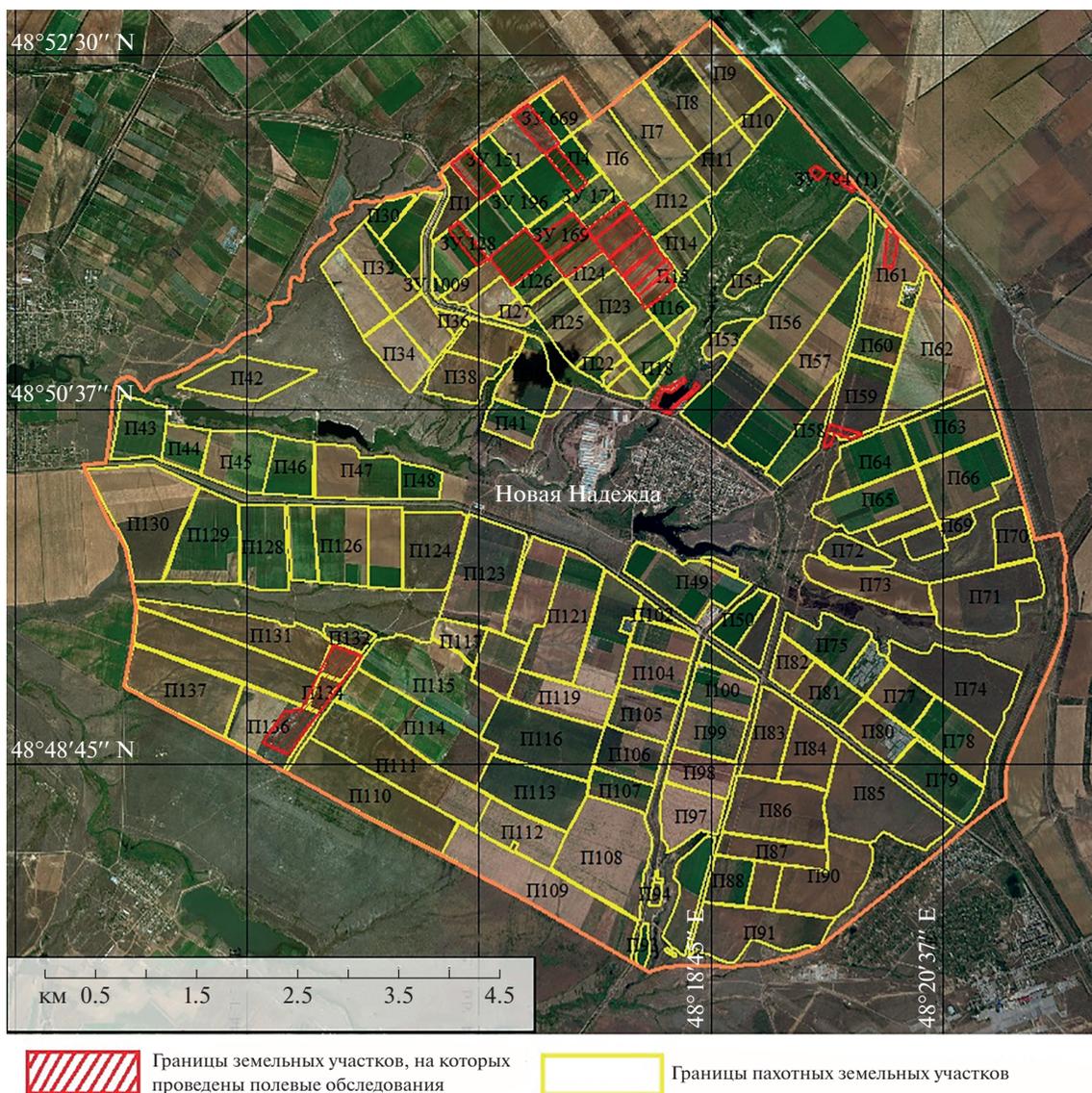


Рис. 2. Карта расположения пахотных участков в границах Новонадеждинского сельского поселения.

где произошло уменьшение площади муниципального образования на 3.3%, доля сельскохозяйственных угодий возросла на 3.8% за счет распашки пастбищ и использования их в качестве пашни.

Подробная информация о пространственном распределении и использовании орошаемых угодий на изучаемой территории в целом по региону до сих пор является неструктурированной (Lesiv, Schepaschenko, 2018). Отсутствие локальной геоинформационной системы учета орошаемых земель может привести к нарушению экологического равновесия агроландшафта и потери продуктивности особо ценной категории земель.

Новизна данной работы не может рассматриваться только в рамках исследуемой территории, так как проведение подобных изысканий является необходимым для 4.67 млн га орошаемой паш-

ни (по данным отчета Министерства сельского хозяйства 2020 г.) и это возможно только с применением ГИС-технологий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. 320 с.
- Готов А.А.* Применение данных о рельефе для эффективного использования сельскохозяйственных земель // Геопрофи, 2013. № 4. С. 20–22.
- Денисова Е.В.* Применение геоинформационных технологий для анализа состояния земель сельскохозяйственного назначения // Астраханский вестник экологического образования, 2019. № 4. С. 33–39.
- Денисова Е.В.* К вопросу учета орошаемых угодий Волгоградской области с применением дистанционного мониторинга // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс], 2021. Т. 11. № 1. С. 113–128.

URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1181> (дата обращения: 16.02.2021).

<https://doi.org/10.31774/2222-1816-2021-11-1-113-128>.

Докучаев В.В. Наши степи прежде и теперь. М.: СЕЛЬХОГИЗ, 1936. 123 с.

Лопырев М.И., Недикова Е.И., Харитонов А.А. Агрландшафт как фактор устойчивости землепользования и землеустройства // Вестник Воронежского ГАУ, 2015. С. 179–183.

Мельникова Е.Б. Аэрокосмический мониторинг нарушенных сельскохозяйственных земель // Изв. вузов “Геодезия и аэрофотосъёмка”. 2010. № 2. С. 75–78.

Папаскири Т.В., Ананичева Е.П. Информационное взаимодействие с сервисами цифрового землеустройства // Московский экономический журнал, 2020. № 7. С. 260–267.

Папаскири Т.В. Информационное обеспечение землеустройства. М.: Изд-во ГУЗ, 2013. 160 с.

ISBN 978-5-905742-56-9.

Папаскири Т.В. Разработка Федеральной Целевой Программы “По созданию системы автоматизированного землеустроительного проектирования (САЗПР) и пакета прикладных программ (ППП) на выполнение первоочередных видов землеустроительных и смежных работ на территорию Российской Федерации” // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель, 2014. № 4. С. 14–25.

Постолов В.Д., Нартова Е.А., Масленникова С.В. О совершенствовании землеустроительного проектирования // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект), 2019. № 2(9). С. 71–74.

Рябинина Н.О. Физико-географическое районирование как основа выявления эталонных ландшафтов Волгоградской области // Вестник Волгогр. гос. ун-та. Сер. 11: Естественные науки, 2011. № 2(2). С. 69–75.

Смирнова Л.Г., Нарожная А.Г., Кривоконь Ю.Л., Петрякова А.А. Применение геоинформационных систем для агроэкологической оценки земель при проектирова-

нии адаптивноландшафтных систем земледелия. Достижения науки и техники АПК // 2011. № 11. С. 11–14.

Ханбабаев Т.Г., Догеев Г.Д., Велибекова Л.А. Оценка эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения // Международный научно-исследовательский журнал, 2015. № 9(40). С. 70–73.

Цифровая база данных высот (CGIAR-CSI).

URL: <http://srtm.csi.cgiar.org> (дата обращения: 18.02.2021).

Цифровая модель рельефа URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus>, 2021; (дата обращения: 18.02.2021).

Amin A., Fazal S. Quantification of Land Transformation Using Remote Sensing and GIS Techniques // American J. Geographic Information System. 2012. V. 1. № 2. P. 17–28.

Erol H., Akdeniz F. A. Per-field classification method based on mixture distribution models and an application to Landsat Thematic Mapper data // Int. J. Remote Sens. 2005. № 26. P. 1229–1244.

Lesiv M., Schepaschenko D., Moltchanova E., Bun R., Dürauer M., Prishchepov A., Schierhorn F., Estel S., Kuemmerle T., Alcantara Concepcion Pedro Camilo, Kussal N., Shchepashchenko M., Kutovaya O., Martynenko O., Karmirov V., Shvidenko A., Havlík P., Kraxner F., See L., Fritz S. Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries // Scientific Data. 2018, 5: 180056.

<https://doi.org/10.1038/sdata.2018.56>

Lidin K.L., Meerovich M.G., Bulgakova E.A., Vershinin V.V., Papaskiri T.V. (2018): Applying the theory of informational flows in urbanism for a practical experiment in architecture and land use *Espacios*, № 1(39), 12.

Rawat J.S., Kumar Manish. Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India // The Egyptian J. Remote Sensing and Space Science. 2015. V. 18. Is. 1. P. 77–84.

Roy D.P., Wulder M.A., Loveland T.R. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research // Remote Sensing of Environment. 2014. № 145. P. 154–172.

## The Use of GIS Technologies to Create a Local Geoinformation System for the Accounting of Irrigated Lands

E. V. Denisova

*Federal State Budget Scientific Institution “Federal Scientific Centre of agroecology, complex melioration and protective afforestation of the Russian Academy of Sciences”, Volgograd, Russia*

The lack of an up-to-date cartographic basis leads to uncontrolled turnover of land, does not reflect their real state and use, thereby causing destruction and degradation not only of individual components of the agricultural landscape, but also of entire natural systems. The agricultural landscape is a complex ecological system that, under harsh conditions of consumption, loses its ability to self-repair and regulate for a very long time. And each of its components needs to be accounted for, monitored and protected. Irrigated lands represent a special component in this system, on the condition of which the receipt of agricultural products depends, regardless of the amount of precipitation. The purpose of the work is to conduct remote monitoring of irrigated and rain-fed lands using GIS technologies to structure them and create a local geoinformation system for accounting for irrigated areas. The data obtained using geoinformation technologies revealed a discrepancy in the area of the Novonadezhdinsky municipality of the Gorodishchensky district of the Volgograd region by 200 hectares or 3.3%, the area of agricultural land increased by 157.8 hectares or 3.8% (compared to 2010 data). Using remote methods, an assessment of 159 contours of arable land on an area of 4134.6 hectares was carried out, with the determination of their configuration, size (from 0.37 to 129.2 ha), average slope steepness – 0.92°, height difference throughout the study area – 53 m. More than 18% of the territory has a slope steepness of more than 3°, which in conditions of irrigation application can provoke an increase in degradation processes. The conducted field studies within the boundaries of 19 land plots made it possible to clarify the nature and mode of use of each plot – irrigated or rain-fed, to determine the type of crops, permitted use, as well as the presence of protective forest strips as one of the components of the agricultural landscape. The unavailability of information on the accounting of irrigated lands, their distribution, and the dynamics of the state is an urgent problem not only in this region. The methods of conducting such studies of agricultural land

are especially relevant for keeping records of land resources, their legal use, and the formation of the tax base of any region. The novelty of the research lies in the creation of a local geoinformation system for accounting for irrigated lands, structuring information about their spatial distribution, use and formation of a mechanism for socio-economic and environmental regulation of land management on the example of a separate region.

*Keywords:* agrolandscape, GIS technologies, monitoring, irrigated lands, arable lands, system, accounting

## REFERENCES

- Amin A., Fazal S.* Quantification of Land Transformation Using Remote Sensing and GIS Techniques // *American J. Geographic Information System*. 2012. V. 1. № 2. P. 17–28.
- Denisova E.V.* K voprosu ucheta oroshayemykh ugodij Volgogradskoj oblasti s primeneniem distancionnogo monitoringa [On the issue of accounting for irrigated lands of the Volgograd region using remote monitoring] // *Scientific J. Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*. 2021. V. 11. № 1. P. 113–128 (In Russian)  
<https://doi.org/10.31774/2222-1816-2021-11-1-113-128>
- Denisova E.V.* Primenenie geoinformacionnykh tekhnologij dlya analiza sostoyaniya zemel' sel'skohozyajstvennogo naznacheniya [Application of geoinformation technologies for the analysis of the state of agricultural land] // *Astrakhan Bulletin of Environmental Education*. 2019. № 4. P. 33–39. (In Russian)
- Dokuchaev V.V.* Nashi stepi prezhde i teper' [Our steppes before and now]. Moscow: AGRICULTURAL PRODUCTS. 1936. 123 p. (In Russian)
- Erol H., Akdeniz F.A.* Per-field classification method based on mixture distribution models and an application to Landsat Thematic Mapper data // *Int. J. Remote Sens.* 2005. № 26. P. 1229–1244.
- Glotov A.A.* Primenenie dannykh o rel'efe dlya effektivnogo ispol'zovaniya sel'skohozyajstvennykh zemel' [Application of relief data for efficient use of agricultural land] // *Geoprofi.* 2013. № 4. P. 20–22. (In Russian)
- Hanbabaev T.G., Dogeev G.D., Velibekova L.A.* Ocenka effektivnosti ispol'zovaniya zemel' sel'skohozyajstvennogo naznacheniya [Evaluation of the efficiency of agricultural land use] // *International Research Journal*. 2015. V. 40. № 9. P. 70–73. (In Russian)
- Lesiv M., Schepaschenko D., Moltchanova E., Bun R., Dürauer M., Prishchepov A., Schierhorn F., Estel S., Kuemmerle T., Alcantara Concepcion Pedro Camilo, Kussul N., Shchepashchenko M., Kutovaya O., Martynenko O., Karminov V., Shvidenko A., Havlík P., Kraxner F., See L., Fritz S.* Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries // *Scientific Data*. 2018, 5: 180056.  
<https://doi.org/10.1038/sdata.2018.56>
- Lidin K.L., Meerovich M.G., Bulgakova E.A., Vershinin V.V., Papaskiri T.V.* Applying the theory of informational flows in urbanism for a practical experiment in architecture and land use // *Espacios*. 2018. V. 39. № 1. 12 p.
- Lopyrev, M.I., Nedikova E.I., Haritonov A.A.* Agrolandshaft kak faktor ustojchivosti zemlepol'zovaniya i zemleustrojstva [Agrolandscape as a factor of sustainability of land use and land management] // *Bulletin of the Voronezh GASU*. 2015. P. 179–183. (In Russian)
- Mel'nikova E.B.* Aerokosmicheskij monitoring narushennykh sel'skohozyajstvennykh zemel' [Aerospace monitoring of disturbed agricultural land] // *Izv. vuzov "Geodesy and aerial photography"*. 2010. V. 2. P. 75–78. (In Russian)
- Papaskiri T.V., Ananicheva E.P.* Informacionnoe vzaimodejstvie s servisami cifrovogo zemleustrojstva [Informational interaction with digital land management services] // *Moscow Economic J.* 2020. № 7. P. 260–267. (In Russian)
- Papaskiri T.V.* Informacionnoe obespechenie zemleustrojstva [Information support of land management], Moscow: GUZ Publishing House, 2013, 160 p. (In Russian)
- Papaskiri T.V.* Razrabotka Federal'noj Celevoj Programmy "Po sozdaniyu sistemy avtomatizirovannogo zemleustroitel'nogo proektirovaniya (SAZPR) i paketa prikladnykh programm (PPP) na vypolnenie pervoocherednykh vidov zemleustroitel'nykh i smezhnykh rabot na territoriyu Rossijskoj Federacii" [Development of the Federal Target Program "On creation of the system of the automated land management design (SAZPR) and the package of the applied programs (SPP) for performance of the priority types of land management and related works on the territory of the Russian Federation"] // *Land management, cadastre and land monitoring*. 2014. № 4. P. 14–25. (In Russian)
- Postolov V.D., Nartova E.A., Maslennikova S.V.* O sovershenstvovanii zemleustroitel'nogo proektirovaniya [On the improvement of land management design] // *Models and technologies of environmental management (regional aspect)*. 2019. № 2(9). P. 71–74. (In Russian)
- Rawat J.S., Kumar Manish.* Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India // *The Egyptian J. Remote Sensing and Space Science*. 2015. V. 18. Is. 1. P. 77–84.
- Roy D.P., Wulder M.A., Loveland T.R.* Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research // *Remote Sensing of Environment*. 2014. № 145. P. 154–172.
- Ryabinina N.O.* Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie kak osnova vyyavleniya etalonnnykh landshaftov Volgogradskoj oblasti [Physical and geographical zoning as a basis for identifying reference landscapes of the Volgograd region] // *Bulletin of the Volgogr. State University*. V. 11. 2011. № 2(2). P. 69–75. (In Russian)
- Smirnova L.G., Narozhnyaya A.G., Krivokon' Yu.L., Petryakova A.A.* Primenenie geoinformacionnykh sistem dlya agroekologicheskoy ocenki zemel' pri proektirovanii adaptivnolandshaftnykh sistem zemledeliya [Application of geoinformation systems for agroecological assessment of lands in the design of adaptive landscape farming systems] // *Achievements of science and technology of agriculture*. 2011. № 11. P. 11–14. (In Russian).
- Tsifrovaya baza dannykh vysot (CGIAR-CSI).  
URL: <http://srtm.csi.cgiar.org> (accessed: 18.02.2021).
- Tsifrovaya model' rel'efa URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus>, 2021.  
<https://srtm.csi.cgiar.org>, 2021) (accessed: 18.02.2021).
- Vinogradov B.V.* Aerokosmicheskij monitoring ekosistem [Aerospace ecosystem monitoring]. Moscow: The science, 1984, 320 p. (In Russian)